



**José Miguel
Benzinho**

**Avaliação Económica de Redes FTTH em Diferentes
Cenários Geográficos**



**José Miguel
Benzinho**

**Avaliação Económica de Redes FTTH em
Diferentes Cenários Geográficos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações realizada sob a orientação científica do Doutor A. Manuel Oliveira Duarte, Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e da Doutora Raquel Matias da Fonseca, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Professor Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Vogal – Arguente
Principal**

Professor Doutor Carlos Rabadão
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria

Vogal – Orientador

Professor Doutor Aníbal Manuel de Oliveira Duarte
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogal – Co-Orientador

Professora Doutora Raquel Matias da Fonseca
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor Manuel de Oliveira Duarte pelo apoio, disponibilidade e orientação que me possibilitou trabalhar numa área de que gosto. Sem a sua contribuição não teria sido possível. Igualmente, gostaria de agradecer à professor Raquel Fonseca pelo apoio que tem vindo a prestar ao Grupo de Sistemas de Banda Larga em aspectos de análise económica e financeira, do qual este trabalho foi um beneficiário directo.

De igual forma, a todos os meus colegas de curso que para além disso foram amigos nesta caminhada que agora termina. Aos colegas do GSBL pela amizade e bom ambiente que sempre proporcionaram, principalmente ao David pelo forte apoio que me deu nesta dissertação.

À minha família, principalmente aos meus pais pelo carinho, paciência e amor que sempre me deram.

palavras-chave

Redes de Acesso, banda larga, PON, FTTH, modelos geométricos, distribuição populacional, *splitting*, estudo técnico-económico.

resumo

O estado actual das redes de telecomunicações, um pouco por todo o mundo, tem como traço marcante a incapacidade do segmento de acesso em acompanhar o forte crescimento das necessidades de conectividade imposto pelo uso, cada vez mais generalizado, dos serviços telemáticos. Por esta razão, é imperioso evoluir no sentido das denominadas Redes de Acesso de Nova Geração (RANG). Neste contexto as soluções baseadas na utilização de fibra óptica como meio físico de transmissão assumem uma especial relevância mas colocam grandes desafios em termos da sua engenharia e viabilidade económica.

Tomando como referência uma RANG com tecnologia FTTH – PON (*Fibre to the Home – Passive Optical Network*), este trabalho tem em vista contribuir para a compreensão da problemática geral associada à engenharia e à avaliação económica das referidas redes.

Como ponto de partida para se atingir estes objectivos, é feito o enquadramento das redes de acesso no contexto geral das redes de telecomunicações e são identificadas as soluções tecnológicas baseadas em fibra óptica com maior aceitação mundo.

De seguida procede-se à compilação e adaptação de um conjunto de modelos geométricos e ferramentas de avaliação económica que são utilizados para construir uma abordagem aos seguintes aspectos do projecto de uma rede FTTH – PON: (i) incerteza inerente à adesão dos utilizadores e (ii) sua localização territorial, (iii) implicações do número de níveis de *splitting* e respectivos rácios, (iv) implicações do *link budget* e (v) avaliação financeira do projecto de investimento associado.

De forma complementar, esta dissertação tem também em vista contribuir para a disponibilização de materiais didácticos que possam ser de utilidade, a quem pretenda adquirir uma melhor compreensão acerca dos modelos matemáticos usados, para representar as distribuições populacionais em estudo, e das relações entre o projecto engenharia de redes de acesso e as suas implicações técnico-económicas.

Keywords

Access Networks; broadband, PON, FTTH, geometric models, population distribution, splitting, tecno-economic analysis.

Abstract

At their current stage, telecommunication networks around the world have a common characteristic. This is the inability of the access segment to keep up with the high increase in population needs. As a result of this, it is crucial that investment projects are put in place in order to ensure that the so called 'New Generation Networks' (NGN) eventually reach the customers household.

In this document I look at the uncertainty surrounding the issues that come with this surge of new clients; the main issue is the distance the user is from the operator's central office. Knowledge of the change in costs related to this distance, on the part of the telecommunications operator, could be crucial in the creation of strategic guidelines within the marketing proposal which aims to lower the level of investment required for the NGN rollout.

In order to construct these guidelines, in this dissertation, I focus on presenting a sensible analysis of the variation of costs associated with a "Fibre To The home" network rollout. In particular I will consider the cost variation of the following parameters:

- Population distribution within an area;
- The amount of splitting steps and their ratio;
- Link Budget;
- Market approach.

Furthermore, the goal of this dissertation was to contribute towards the provision of teaching materials that can be used by someone wishing to gain a better understanding of the mathematical models used to represent the population distribution, and also the relationship between design engineering access networks and their implications for techno-economic considerations.

Índice

Índice de Figuras	XI
Índice de Tabelas	XIX
Lista de Siglas e Acrónimos.....	XXVII
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2. Organização das Redes de Telecomunicações	5
2.1 Rede Nuclear.....	6
2.2 Rede de Acesso	9
2.2.1 Rede Telefónica Fixa.....	12
2.2.2 Rede xDSL	14
2.2.3 Redes CATV	15
2.2.4 Redes de fibra óptica.....	18
2.2.5 Redes sem Fios.....	20
2.2.5.1 Difusão em espaço livre	21
2.2.5.2 Redes Celulares Móveis.....	21
2.3 Rede do Cliente	31
3. Architecturas de Fibra Óptica nas Redes de Acesso.....	33
3.1 Architecturas FTTx.....	33
3.2 Tecnologias e Soluções de Rede	34
3.2.1 Passive Optical Networks.....	34
3.2.1.1 GPON	38
3.2.1.2 EPON.....	40
3.2.2 <i>Active Optical Networks</i>	41
4. Modelos Geométricos para Parametrização da Distância OLT-ONU ..	43
4.1 Introdução e pressupostos	43
4.2 Modelos de Distribuição Geográfica [20].....	45

4.2.1	Distribuição Uniforme	45
4.2.2	Distribuição Não Uniforme da População	48
4.2.2.1	Processo de Poisson	48
4.2.2.2	População com Distribuição Gaussiana	53
4.3	Conversão da Distância Linear em Distância Real	55
4.4	<i>Link Budget</i>	59
4.5	Níveis de <i>Splitting</i>	61
4.6	Outros Modelos Geométricos	63
4.6.1	TONIC	66
4.6.2	SYNTHEsys	70
4.6.2.1	SYNTHEsys Modificado	73
4.6.2.2	Modelo Estrela-Barramento	73
4.6.3	SARDANA	75
5.	Análise Técnico-Económica de uma solução FFTH	77
5.1	Ferramenta de Cálculo	78
5.1.1	Parâmetro de Entrada	79
5.1.2	Elementos de Custo da Rede	80
5.1.3	Critérios de Avaliação	86
5.1.3.1	CAPEX	86
5.1.3.2	OPEX	88
5.1.3.3	Receitas	89
5.1.3.4	Cash-Flow	90
5.1.3.1	Análise de sensibilidade	92
5.2	Cenários de Estudo	92
5.3	Configuração A – Um nível de <i>Splitting</i>	93
5.3.1	Geografia e Distância Média Optimizada	94
5.3.2	Mercado	97
5.3.3	Material e Custos	98
5.3.4	CAPEX	100
5.3.4.1	Parâmetro ρ	106
5.3.4.2	Distribuição Populacional	107

5.3.4.3	Investimento Faseado	108
5.3.5	OPEX.....	112
5.3.6	Receitas.....	114
5.3.7	Resultados.....	115
5.3.8	Análise de sensibilidade	121
5.4	Configuração B – Dois níveis de <i>Splitting</i>.....	124
5.4.1	Geografia e Distância Média Optimizada.....	124
5.4.2	Mercado.....	125
5.4.3	Material e Custos.....	125
5.4.4	CAPEX.....	126
5.4.4.1	Parâmetro ρ e τ	133
5.4.4.2	Rácio de Splitting.....	134
5.4.4.3	Investimento Faseado	136
5.4.5	OPEX e Receitas.....	138
5.4.6	Resultados.....	138
5.4.7	Análise de sensibilidade	140
5.5	Configuração C – Localização distante	141
5.5.1	Geografia e Distância Média Optimizada.....	142
5.5.2	Mercado.....	144
5.5.3	Material e Custos.....	144
5.5.4	CAPEX.....	145
5.5.4.1	Investimento Faseado	146
5.5.5	OPEX.....	147
5.5.6	Receitas.....	147
5.5.7	Resultados.....	148
5.5.8	Análise de Sensibilidade	148
5.6	Configuração D – Opções de Infra-estrutura	149
5.6.1	Configuração A com condutas	151
5.6.2	Configuração A com valas.....	154
5.6.3	Configuração C com condutas e valas.....	156
5.7	Conclusões	159

6.	Considerações Finais	163
6.1	Conclusões	163
6.2	Trabalho Futuro	164
7.	Referências.....	167
	Anexo A: Processos Matemáticos	173
A.1.	Processo de Poisson	173
A.2.	Distribuição de Gauss	175
	Anexo B: Distância média entre o centro de um círculo e um ponto aleatório P contido no seu interior [20]	179
	Anexo C: Metodologia para a classificação de áreas geográficas [20]	181
C.1.	Introdução e Pressupostos	181
C.2.	Metodologia <i>Cluster</i>	182
C.2.1.	Pressupostos do modelo.....	184
C.3.	Identificação e Caracterização das Áreas Rurais usando a Metodologia Cluster	185
C.3.1.	Percentagem de área coberta (caso particular do Minho).....	189

Índice de Figuras

Figura 1 – Vista representativa de várias populações isoladas, ilustrando uma forma de distribuição não uniforme da população.	2
Figura 2 - Esquematização da organização das redes de telecomunicações [21].	5
Figura 3 – Diferentes tecnologias e serviços utilizados actualmente nos diferentes segmentos de rede [21].	6
Figura 4 - Esquematização das topológicas de rede mais comuns.	7
Figura 5 - Representação simplificada de uma rede de acesso, com tecnologia FTTx.	9
Figura 6 - Representação esquemática de diversas tecnologias da rede de acesso [30].	10
Figura 7 - Equipamento ONT casa de um cliente FTTH.	11
Figura 8 – Rede genérica das redes de telefone fixas. Adaptado de [21].	13
Figura 9 - Variação da taxa de transmissão (Mbps) com a distância (km) ao DSLAM, para três tecnologias xDSL mais comuns [24].	15
Figura 10 - Estrutura de uma rede de distribuição por cabo. Adaptado de [21].	16
Figura 11 – Ligação DOCSIS [12].	17
Figura 12 – Cabo contendo 76 fibras ópticas [28].	19
Figura 13 – Corte transversal a um cabo contendo 76 fibras ópticas [28].	20
Figura 14 – Constituição do cabo de fibra óptica Erro! A origem da referência não foi encontrada..	20
Figura 15 – Exemplo de uma rede celular.	22
Figura 16 – Componentes essenciais de uma rede GPRS. Adaptado de [33].	23
Figura 17 - Arquitectura de um sistema UMTS. Adaptado de [33].	25
Figura 18 - Arquitectura LTE (<i>data only</i>) [11].	28
Figura 19 – Camadas da norma 802.16 (PHY e MAC) [8].	29
Figura 20 – Rede WiMax.	30
Figura 21 – Relação Mobilidade – Velocidade. Adaptado de [51].	31
Figura 22 – Principais terminologias FTTx [12].	33

Figura 23 - Cronologia das Tecnologias PON. Adaptado de Erro! A origem da referência não foi encontrada.....	36
Figura 24 - Representação das tecnologias TDM-PON. Adaptado de [50].	36
Figura 25 - Representação das tecnologias WDM-PON [40].	37
Figura 26 - Representação das tecnologias WDM e TDM em funcionamento simultâneo. Adaptado de [50].	38
Figura 27 - Esquema de um OLT. Adaptado de [14].	39
Figura 28 – Pontos de flexibilidade nas várias zonas da rede de acesso [19].	44
Figura 29 – Configuração FTTH, com apenas um nó de distribuição / agregação [16].	44
Figura 30 – CO centralizado numa área quadrada a servir, com dispersão uniforme da população [20].	45
Figura 31 – CO localizado num dos extremos de uma área quadrada a servir, com dispersão uniforme da população [20].	46
Figura 32 – Gráfico representativo do número de habitantes com o aumento da distância, para um CO localizado no extremo da área a servir.	46
Figura 33 – Relações trigonométricas [20].....	46
Figura 34 – Resultados da função de Poisson, com variação do parâmetro λ [42].	49
Figura 35 – Resultados da função de Poisson cumulativa, com variação do parâmetro λ [42]. ...	49
Figura 36 – CO numa extremidade de uma área a cobrir, com aumento populacional proporcional à distância.	50
Figura 37 – Função de Poisson para $L_{\max}=1\text{km}$ e população 50000.	50
Figura 38 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000, com representação da distância média.	51
Figura 39 – CO numa extremidade de uma área a cobrir, com diminuição populacional proporcional à distância.....	51
Figura 40 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000.....	52
Figura 41 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000, com representação da distância média.	52
Figura 42 – Função densidade de probabilidade para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal <i>standard</i> [23].	53
Figura 43 – Representação simplista do aumento de densidade populacional centralizada na área a servir.	54

Figura 44 – Representação gráfica da função normal com $L_{\max}=1$	54
Figura 45 – Representação gráfica da função normal $L_{\max}=1$, com saliência para metade da área do gráfico (metade da população).....	55
Figura 46 – Organização perfeita de ruas numa localidade (paralelamente / perpendicularmente). 56	
Figura 47 – Modelo Territorial dos quadrados distribuídos regularmente [34].	57
Figura 48 – Divisão territorial homogênea de Aveiro em quadrados.	58
Figura 49 – Distância do ponto de agregação ao central office é um elemento chave na definição da rede [45].	61
Figura 50 – Configuração FTTH, com um degrau de <i>splitting</i> [16].	61
Figura 51 – Impacto do parâmetro ρ [14].	62
Figura 52 – Esquema de rede com dois degraus de <i>splitting</i> . Adaptado de [16].	63
Figura 53 – Impacto do parâmetro ρ e τ . Adaptado de [14].	63
Figura 54 – Evolução da construção dos loteamentos. Adaptado de [45].	64
Figura 55 – Condutas para passagem da cablagem [45].	64
Figura 56 – Opções de instalação: instarão aquando do aparecimento de novos clientes, à esquerda, e instalação preventiva usando fibra escura, à direita. Adaptado de [45].	65
Figura 57 – Representação da ligação <i>central office</i> – nó de agregação [45].	65
Figura 58 – Terminologia geométrica. Adaptado de [45].	67
Figura 59 – Coordenadas e caminho entre ponto de flexibilidade e cliente [4].	68
Figura 60 – Modelo da área da metodologia TONIC, com representação da distância p [4].	69
Figura 61 – Topologia em anel ($n = 8$). Adaptado de [4].	69
Figura 62 – Área modelo para a topologia em anel ($n=54$) [22].	70
Figura 63 – Topologia em barramento ($n=18$). Adaptado de [4].	70
Figura 64 – Modelo Optimum [4].	71
Figura 65 – Modelo SYNTHESYS modificado. Adaptado de [4].	73
Figura 66 – Barramento de nível superior na arquitectura de rede Estrela-Barramento. Adaptado de [4]. 74	
Figura 67 – Representação da ligação do canal de barramento até casa do cliente na arquitectura de rede Estrela-Barramento. Adaptado de [4].	74

Figura 68 – Topologia da rede SARDANA [45].	75
Figura 69 - Modelo Geográfico da metodologia SARDANA [44].	76
Figura 70 – Estrutura da ferramenta de análise técnico-económica [16].	78
Figura 71 – Curva logística em “S” representando três tipos de penetrações de mercado, para 15 unidades de tempo.	79
Figura 72 – Faseamento de intervenções de incremento da capacidade de uma rede [17].	87
Figura 73 - Aproximação de uma função de capacidade contínua através de uma função discreta [17].	88
Figura 74 – Resumo das características de cada configuração.	93
Figura 75 – Configuração com um degrau de <i>splitting</i> [16].	94
Figura 76 - Zona Urbana de Aveiro.	94
Figura 77 – Representação da localização do CO e Lmax em relação à área a cobrir.	95
Figura 78 – Distribuição populacional uniforme.	96
Figura 79 – População próxima do CO.	96
Figura 80 – Distribuição Normal da população.	96
Figura 81 – Curvas de penetração de Mercado para um período de 10 anos.	98
Figura 82 - Esquema da configuração A. Adaptado de [17].	99
Figura 83 – Representação gráfica das percentagens do investimento de classe de equipamento em relação ao investimento total, para uma abordagem “optimista”.	101
Figura 84 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “optimista”.	102
Figura 85 – Representação gráfica das percentagens dos custos totais em material, para uma abordagem “mediana”.	103
Figura 86 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “mediana”.	103
Figura 87 – Representação gráfica das percentagens dos custos totais em material, para uma abordagem “pessimista”.	104
Figura 88 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “pessimista”.	104
Figura 89 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.	105

Figura 90 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.	105
Figura 91 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para $\rho = 0,8$ (caso “optimista”), $\rho = 0,5$ e $\rho = 0,2$	107
Figura 92 – Investimento acumulado em fibra óptica ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para os 3 tipos de distribuição populacional analisados.	108
Figura 93 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado.	109
Figura 94 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “optimista”.	110
Figura 95 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado, para uma abordagem “mediana”.	111
Figura 96 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “mediana”.	111
Figura 97 - Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado, para uma abordagem “pessimista”.	112
Figura 98 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “pessimista”.	112
Figura 99 – OPEX anual para as 3 abordagens de mercado, ao longo dos 10 anos do estudo económico.	113
Figura 100 – Custo anual do serviço com erosão, para todas a penetrações de mercado.	115
Figura 101 – Receitas para as três curvas de penetração de mercado, para os 10 anos de estudo económico.	115
Figura 102 – Custo por casa servida e passada para uma penetração optimista.	116
Figura 103 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem “optimista”.	117
Figura 104 – Custo por casa servida e passada para uma penetração mediana.	118
Figura 105 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem mediana.	118
Figura 106 – Custo por casa servida e passada para uma abordagem de mercado pessimista.	119
Figura 107 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem pessimista.	120

Figura 108 – Balanço final das três penetrações de mercado, para os 10 anos em avaliação. .	120
Figura 109 – Comparação do custo por casa passada das 3 penetrações de mercado, para os 10 anos de avaliação económica.	121
Figura 110 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de $< L >$, ao longo do tempo, para o caso “optimista”.	122
Figura 111 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação do número de habitações, ao longo do tempo, para o caso “optimista”.	123
Figura 112 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de ρ , ao longo do tempo, para o caso “optimista”.	123
Figura 113 – Configuração com dois degraus de <i>splitting</i> [16].	124
Figura 114 - Solução FTTH com os diferentes itens e respectivos rácios.	126
Figura 115 – Representação gráfica das percentagens dos custos em material, para uma abordagem “optimista”.	128
Figura 116 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “optimista”.	128
Figura 117 – Comparação entre a configuração A e B para o custo acumulado em cablagem de fibra. 129	
Figura 118 – Comparação entre a configuração A e B para o custo acumulado em <i>splitters</i>	129
Figura 119 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “mediana”.	130
Figura 120 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “pessimista”.	131
Figura 121 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.	132
Figura 122 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.	132
Figura 123 – Investimento acumulado em fibra óptica para as diferentes opções de um ρ e τ . 134	
Figura 124 – Investimento acumulado para as três opções de rácio do equipamento.	136
Figura 125 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado.	138
Figura 126 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “optimista”.	138

Figura 127 – Custo por casa servida e passada para uma penetração optimista.....	139
Figura 128 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem “optimista”.....	140
Figura 129 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de ρ (com $\tau = 0,1$), ao longo do tempo, para os 10 anos de estudo de exercício económico.....	140
Figura 130 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de τ (com $\rho = 0,1$), ao longo do tempo, para os 10 anos de estudo de exercício económico.....	141
Figura 131 – Configuração com um degrau de <i>splitting</i> na localização principal e uma ligação remota com dois degraus de <i>splitting</i>	142
Figura 132 – Representação da localização do CO e <i>Lmax</i> em relação à área a cobrir, com adição de uma localização remota, neste caso distanciada de 20km	143
Figura 133 – Representação da distribuição da população para ambas as áreas.....	143
Figura 134 – Diferentes investimentos a considerar.....	146
Figura 135 – Análise à sensibilidade do custo por casa servida em função do aumento do número de clientes na localização remota.	148
Figura 136 – Análise à sensibilidade do custo por casa servida em função do aumento da distância da localização remota.	149
Figura 137 - Modelos de negócio de banda larga fixa, para o caso português.....	150
Figura 138 – Comparação do investimento anual entre a configuração A com e sem a implementação de uma rede de condutas	152
Figura 139 - Custo por casa servida e passada, com a inclusão dos custos de infra-estruturas.....	153
Figura 140 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, com a inclusão dos custos de infra-estruturas.....	153
Figura 141 – Comparação do investimento anual entre a configuração A com e sem a implementação de valas.....	154
Figura 142 – Custo por casa servida e passada.....	156
Figura 143 – Resultados do exercício económico, para uma configuração com um degrau de <i>splitting</i> e implementação de valas para passagem da cablagem.....	156
Figura 144 – Comparação entre o cenário com implementação de infra-estruturas e sem criação das mesmas.	157
Figura 145 – Custo por casa servida e passada.....	158

Figura 146 – Resultados do exercício económico, para uma configuração com um degrau de splitting e implementação de valas para passagem da cablagem.....	159
Figura 147 – Tabela comparativa das variações dos parâmetros de saída em função da variação dos diferentes parâmetros de entrada.	160
Figura 148 – Representação da curva “sino” com identificação dos parâmetros μ e σ [6].....	175
Figura 149 – Função densidade de probabilidade para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal <i>standard</i> [23].	176
Figura 150 – Quantil de ordem 0,95, que terá valor positivo [6].	176
Figura 151 – Quantis 0,025 e 0,975, em que z terá um valor negativo e positivo, respectivamente [6].	176
Figura 152 - Função densidade de probabilidade cumulativa para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal <i>standard</i> [23].	177
Figura 153 – Circulo externo de raio b e circulo interno de raio r variável entre $[0;b]$ [20].	179
Figura 154 – Unidade Territorial Administrativa [34].	182
Figura 155 - Modelo Territorial dos quadrados distribuídos regularmente [34].	183
Figura 156 – Modelo geométrico [34].....	185
Figura 157 - Densidades populacionais dos municípios e as áreas rurais seleccionadas [20]..	186
Figura 158 – Ilustração do Alentejo [20].....	187
Figura 159 – Ilustração do Douro [20].....	187
Figura 160 – Ilustração da Bairrada [20].	188
Figura 161 – Ilustração do Minho [20].	188
Figura 162 – Raio de alcance é menor que metade do lado do quadrado.	190
Figura 163 – O raio de alcance é maior que metade da diagonal do quadrado.	190
Figura 164 – O raio de alcance está na situação intermédia dos dois pontos anteriores.	190
Figura 165 – Pormenor de um quarto do cluster.	191
Figura 166 – Percentagem de população servida em função do raio da tecnologia	192

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Taxas de Transmissão para tecnologia GPON [19].	40
Tabela 2 – Parâmetro de conversão k para diversas áreas específicas da zona urbana de Aveiro 59	
Tabela 3 – Preço inicial do equipamento utilizado.	82
Tabela 4 – Maturidade do equipamento utilizado [8].	83
Tabela 5 – Classes da curva de aprendizagem K utilizadas [8].	83
Tabela 6 – Evolução do preço dos componentes.	83
Tabela 7 – Descrição dos elementos de infra-estrutura necessários para uma rede FTTH [44].	84
Tabela 8 – Preços das infra-estruturas utilizadas para cablagem [44].	84
Tabela 9 – Preçário das opções de caixa de visita utilizadas [44].	85
Tabela 10 – Taxas e tarifas relevantes	85
Tabela 11 – L para as diferentes distribuições populacionais	97
Tabela 12 - $L1$ e $L2$ em função da distribuição populacional e da posição do <i>splitter</i> .	97
Tabela 13 – Valores utilizados no cálculo das taxas de penetração.	97
Tabela 14 – Evolução da taxa de penetração para cada abordagem: otimista, mediana e pessimista para os 10 anos de estudo económico.	98
Tabela 15 – Número de clientes para cada abordagem: otimista, mediana e pessimista para os 10 anos de estudo económico.	98
Tabela 16 - Custo e rácios de partilha dos vários componentes.	99
Tabela 17 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	100
Tabela 18 - Custo total de ONU $CONU$, fibra (Cf), <i>splitters</i> (CS) e OLT ($COLT$) para uma abordagem “otimista”.	100
Tabela 19 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para uma abordagem “otimista”.	101
Tabela 20 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “otimista”.	101
Tabela 21 - Custo total de ONU $CONU$, fibra (Cf), <i>splitters</i> (CS) e OLT ($COLT$), para uma abordagem “mediana”.	102

Tabela 22 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem "mediana".	102
Tabela 23 – Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem "mediana".	102
Tabela 24 - Custo total de ONU <i>CONU</i> , <i>fibra (Cf)</i> , <i>spliters (CS)</i> e OLT (<i>COLT</i>), para uma abordagem "pessimista".	103
Tabela 25 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem "pessimista".	103
Tabela 26 – Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem "pessimista".	104
Tabela 27 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	106
Tabela 28 – Influência do parâmetro ρ nos comprimentos <i>L1</i> e <i>L2</i> .	106
Tabela 29 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para um $\rho = 0,8$.	106
Tabela 30 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para um $\rho = 0,5$.	106
Tabela 31 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para um $\rho = 0,2$.	106
Tabela 32 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	107
Tabela 33 - Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para uma população distribuída de forma Gaussiana.	107
Tabela 34 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para uma população distribuída uniformemente.	108
Tabela 35 – Investimento acumulado em <i>fibra (Cf)</i> , para uma população na sua maioria próxima do CO.	108
Tabela 36 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	109
Tabela 37 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem "optimista", ao longo dos 10 anos de estudo económico.	109
Tabela 38- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem "optimista".	109
Tabela 39 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem "mediana", ao longo dos 10 anos de estudo económico.	110
Tabela 40- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem "mediana".	110
Tabela 41 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem "pessimista", ao longo dos 10 anos de estudo económico.	111

Tabela 42- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “pessimista”.....	111
Tabela 43 - Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	113
Tabela 44 – OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “optimista”.....	113
Tabela 45 – Número de clientes e OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “mediana”.	113
Tabela 46 – Número de clientes e OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “pessimista”.....	113
Tabela 47 - Parâmetros usados para análise económica nesta secção.	114
Tabela 48 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado optimista.	114
Tabela 49 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado mediana.....	114
Tabela 50 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado pessimista.	114
Tabela 51 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “optimista”.....	116
Tabela 52 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “optimista”. 116	
Tabela 53 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “optimista”. 116	
Tabela 54 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “mediana”.	117
Tabela 55 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “mediana”.117	
Tabela 56 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “mediana”. 117	
Tabela 57 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “pessimista”.....	118

Tabela 58 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “pessimista”. 119	
Tabela 59 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “pessimista”. 119	
Tabela 60 – Parâmetros de entrada relativos a geografia da configuração B.....	124
Tabela 61 – Influência dos parâmetros ρ e τ nos comprimentos $L1$, $L2$ e $L3$	125
Tabela 62 - Rácios dos vários componentes das três opções.....	125
Tabela 63 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.....	127
Tabela 64 - Custo total de ONU <i>CONU</i> , <i>fibra</i> (Cf), <i>splitters</i> (CS) e OLT ($COLT$) para uma abordagem “optimista”.....	127
Tabela 65 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para uma abordagem “optimista”.....	127
Tabela 66 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “optimista”.....	127
Tabela 67 - Custo total de ONU <i>CONU</i> , <i>fibra</i> (Cf), <i>splitters</i> (CS) e OLT ($COLT$), para uma abordagem “mediana”.	130
Tabela 68 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem “mediana”.	130
Tabela 69 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “mediana”.	130
Tabela 70 - Custo total de ONU <i>CONU</i> , <i>fibra</i> (Cf), <i>splitters</i> (CS) e OLT ($COLT$), para uma abordagem “pessimista”.....	130
Tabela 71 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem “pessimista”.....	131
Tabela 72 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “pessimista”.	131
Tabela 73 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.....	133
Tabela 74 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0,5$ e $\tau = 0,3$	133
Tabela 75 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0$ $\tau = 0,5$	133
Tabela 76 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0,2$ $\tau = 0,7$	133
Tabela 77 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0,2$ $\tau = 0,3$	133
Tabela 78 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0,7$ $\tau = 0,2$	133
Tabela 79 – Investimento acumulado em <i>fibra</i> (Cf), para um $\rho = 0,1$ $\tau = 0,1$	133
Tabela 80 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.....	134

Tabela 81 - Custo total de ONU <i>CONU, fibra (Cf)</i> , <i>splitters (CS)</i> e OLT (<i>COLT</i>) para a opção 1.	
135	
Tabela 82 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 1.	135
Tabela 83 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 1.....	135
Tabela 84 - Custo total de ONU <i>CONU, fibra (Cf)</i> , <i>splitters (CS)</i> e OLT (<i>COLT</i>) para a opção 2.	
135	
Tabela 85 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 2.	135
Tabela 86 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 2.....	135
Tabela 87 - Custo total de ONU <i>CONU, fibra (Cf)</i> , <i>splitters (CS)</i> e OLT (<i>COLT</i>) para a opção 3.	
135	
Tabela 88 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 3.	136
Tabela 89 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 3.....	136
Tabela 90 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.....	137
Tabela 91 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “optimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.....	137
Tabela 92- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “optimista”.	137
Tabela 93 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “optimista”.....	139
Tabela 94 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “optimista”.	
139	
Tabela 95 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “optimista”.	
139	
Tabela 96 – Número de clientes para os 10 anos de estudo económico, já com a adição de 50 novos clientes empresariais no 3º ano.....	144
Tabela 97 – Equipamento necessário para servir localização remota.	144
Tabela 98 - Custo total de ONU <i>CONU, fibra (Cf)</i> , <i>splitters (CS)</i> , OLT <i>COLT</i> e custo da ligação remota(<i>Cextra</i>).	145

Tabela 99 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, e investimento extra no ano 2.	145
Tabela 100 - Investimento anual, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado.	145
Tabela 101 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “optimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.	146
Tabela 102- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “optimista”.....	146
Tabela 103 – OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico.....	147
Tabela 104 – Tarifa anual do serviço do segmento empresarial.	147
Tabela 105 – Tarifa anual do serviço do segmento empresarial.	147
Tabela 106 – Custo das infra-estruturas.	151
Tabela 107 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma rede de condutas.	151
Tabela 108 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.	152
Tabela 109 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.	153
Tabela 110 – Custo por casa servida e custo por casa passada.	153
Tabela 111 – Custo das infra-estruturas.	154
Tabela 112 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma rede de condutas.	154
Tabela 113 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.	155
Tabela 114 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.	155
Tabela 115 – Custo por casa servida e custo por casa passada.	155
Tabela 116 – Custo das infra-estruturas.	157
Tabela 117 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma combinação de condutas e valas.	157
Tabela 118 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.	158

Tabela 119 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.	158
Tabela 120 – Custo por casa servida e custo por casa passada.	158
Tabela 121 – Indicadores geográficos para as áreas rurais em Portugal [34].	189
Tabela 122 – Dados do Minho.	192

Lista de Siglas e Acrónimos

3G	- <i>3rd generation mobile telecommunications</i>
3GPP	- <i>3rd Generation Partnership Project</i>
ADSL	- <i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
AES	- <i>Advanced Encryption Standard</i>
AM	- <i>Amplitude Modulation</i>
APON	- <i>Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network</i>
ATM	- <i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BSS	- <i>Base Station Subsystem</i>
BPON	- <i>Broadband Passive Optical Network</i>
BTS	- <i>Base Transceiver Station</i>
CAPEX	- <i>Capital Expenditure</i>
CATV	- <i>Cable TV (de Community Antenna Television)</i>
CDMA2000	- <i>Code Division Multiple Access</i>
CMTS	- <i>Cable Modem Termination System</i>
CO	- <i>Central Office</i>
CPE	- <i>Customer Premises Equipment</i>
DAB	- <i>Digital Audio Broadcasting</i>
DBA	- <i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DNS	- <i>Domain Name Server</i>
DOCSIS	- <i>Data over Cable Service Interface Specification</i>
DSLAM	- <i>Digital Subscriber Line Access Multiplexer</i>
DTT	- <i>Digital Terrestrial Television</i>
DWDM	- <i>Dense Wavelength-division Multiplexing</i>
EDGE	- <i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
ESCON	- <i>Enterprise Serial Connection</i>
EPON	- <i>Ethernet Passive Optical Network</i>

FDDI	- <i>Fiber Distributed Data Interface</i>
FDMA	- <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FEC	- <i>Forward Error Correction</i>
FM	- <i>Frequency Modulated</i>
FO	- <i>Fibra Óptica</i>
FTTB	- <i>Fiber To The Building</i>
FTTC	- <i>Fiber To The Curb</i>
FTTCab	- <i>Fiber To The Cabinet</i>
FTTH	- <i>Fiber To The Home</i>
FTTN	- <i>Fiber To The Node</i>
FTTP	- <i>Fiber To The Premises</i>
FTTx	- <i>Fiber To The x</i>
GEM	- <i>GPON Encapsulation Method</i>
GGSN	- <i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPON	- <i>Gigabit Passive Optical Network</i>
GPRS	- <i>General Packet Radio Service</i>
GSM	- <i>Global System for Mobile Communications (de Groupe Spécial Mobile)</i>
HDSL	- <i>High-data-rate Digital Subscriber Line</i>
HFC	- <i>Hybrid Fiber-Coaxial</i>
HLR	- <i>Home Location Register</i>
HSDPA	- <i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
IDSL	- <i>ISDN Digital Subscriber Line</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMT	- <i>International Mobile Telecommunications</i>
IP	- <i>Internet Protocol</i>
ISDN	- <i>Integrated Services Digital Network</i>
ITU	- <i>International Telecommunication Union</i>
LAN	- <i>Local Area Network</i>
LR-PON	- <i>Long Reach Passive Optical Network</i>

LTE	- <i>Long Term Evolution</i>
MAN	- <i>Metropolitan Area Network</i>
MAP	- <i>Mobile Application Part</i>
NG-PON	- <i>Next Generation Passive Optical Network</i>
MPCP	- <i>Multi-Point Control Protocol</i>
OAM	- <i>Operations. Administration and Management</i>
OADM	- <i>Optical Add Drop Multiplexer</i>
ODN	- <i>Optical Distribution Network</i>
OLT	- <i>Optical Line Terminal/Termination</i>
ONT	- <i>Optical Network Terminal</i>
ONU	- <i>Optical Network Units</i>
OPEX	- <i>Operational Expenditure</i>
OXC	- <i>Optical Crossconnects</i>
P2PE	- <i>Point-to-Point Emulation</i>
PDA	- <i>Personal Digital Assistant</i>
PDU	- <i>Protocol Data Unit</i>
PLC	- <i>Power Line Communications</i>
PON	- <i>Passive Optical Network</i>
POTS	- <i>Plain Old Telephone Service</i>
PSTN	- <i>Public switched telephone network</i>
RANG	- <i>Rede de Acesso de Nova Geração</i>
REDIS	- <i>Rede Digital com Integração de Serviços</i>
RF	- <i>Radio Frequency</i>
RNC	- <i>Radio Network Controllers</i>
RNG	- <i>Rede de Nova Geração</i>
SCTE	- <i>Society of Cable Telecommunications Engineers</i>
SDH	- <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SDSL	- <i>Symmetrical Digital Subscriber Line</i>
SGSN	- <i>Serving GPRS Support Node</i>

SMF	- <i>Single Mode Fiber</i>
SMS	- <i>Small Messages Service</i>
SONET	- <i>Synchronous Optical Network</i>
TDM	- <i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	- <i>Time Division Multiple Access</i>
TDT	- <i>Televisão Digital Terrestre</i>
TIR	- <i>Taxa Interna de Rentabilidade</i>
UMTS	- <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTP	- <i>Unshielded Twisted Pair</i>
VAL	- <i>Valor Actualizado Líquido</i>
VDSL	- <i>Very-high-speed Digital Subscriber Line</i>
WAN	- <i>Wide Area Network</i>
WCDMA	- <i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WDM	- <i>Wavelength-division Multiplexing</i>
WiMAX	- <i>World Wide Interoperability for Microwave Access</i>
WMAN	- <i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
xDSL	- <i>Digital Subscriber Line</i>

1. Introdução

1.1 Motivação

A crescente procura de serviços de telecomunicações por todo o mundo, com particular destaque para a Internet, devida essencialmente à exploração mais intensiva de novas aplicações com obrigatoriedade de ligação à rede, levou a que as exigências, para com os serviços de banda larga, sofressem um substancial aumento.

A cultura actual de televisão via Internet e do *streaming* de conteúdos multimédia, gera uma procura crescente por velocidades de transmissão extremamente altas, que permitam a utilização destes serviços com elevado débito de dados. Prevê-se que esta realidade venha a ser ainda mais intensiva nos anos vindouros, com o aparecimento de milhões de novos equipamentos terminais com necessidade de acesso à rede, como uma simples máquina de café ou de tabaco muito comuns nos dias de hoje, gerando um crescimento de tráfego significativo. As tecnologias tradicionais baseadas no cobre para as redes de acesso, não irão acompanhar e dar suporte a este crescimento por muito mais tempo. Por estas razões, ao longo destes últimos anos têm sido feitos esforços consideráveis no sentido da remodelação das redes de acesso (segmento sob maior pressão) por todo o mundo, substituindo as actuais infra-estruturas das tecnologias de cobre por fibra óptica, com o claro objectivo de levar maior largura de banda, tanto a clientes privados como empresariais. Alguns projectos de investimento estão já concluídos e a fibra já é visível um pouco por todo o lado, principalmente entre grandes centros urbanos, onde as exigências são maiores. Podemos assim dizer que a fibra está finalmente a chegar à casa do assinante do serviço, isto claro acompanhado pelos mais variados problemas na denominada *last mile* (última milha).

A fibra óptica é vista como a solução para garantir a largura de banda necessária à emergência de novos serviços e ao aumento explosivo de tráfego na Internet. O problema dos seus antecessores (as tecnologias de cobre), prende-se com o facto de as taxas de transmissão de dados terem de ser reduzidas, à medida que o comprimento do cabo aumenta, o que significa que o débito das ligações varia consoante a distância do utilizador à central, acabando por deixar de ser possível para além de determinadas distâncias. Na fibra óptica essas limitações são de muito menor escala tanto em termos de atenuação como de distorção, sendo possíveis ligações de dezenas ou mesmo centenas de quilómetros de comprimento, sem qualquer equipamento de regeneração intermédio.

Torna-se assim crucial realizar um estudo cuidado sobre as características dos projectos de *rollout* de uma rede de fibra até casa.

1.2 Objectivos

São várias as opções, pelas quais um operador poderá optar, para levar serviços telefónicos, de TV e dados ao cliente. A escolha da arquitectura a implementar depende de vários factores, sendo necessário analisar: os serviços que se pretendem disponibilizar; os custos das infra-estruturas; as infra-estruturas já existentes; a localização da rede (sua geografia e demografia) e a capacidade de, no futuro, poder actualizar a rede ou migrar para novas tecnologias. A **Figura 1** ilustra a heterogeneidade inerente à geografia e demografia de uma possível área a servir.

Ao longo deste documento, serão analisados vários tipos de abordagens ao projecto de investimento de uma rede FTTH – PON (*Fiber to the Home – Passive Optical Network*), consoante a geografia e demografia da zona a servir, por forma a diminuir o investimento a realizar e a tirar dele o máximo proveito.

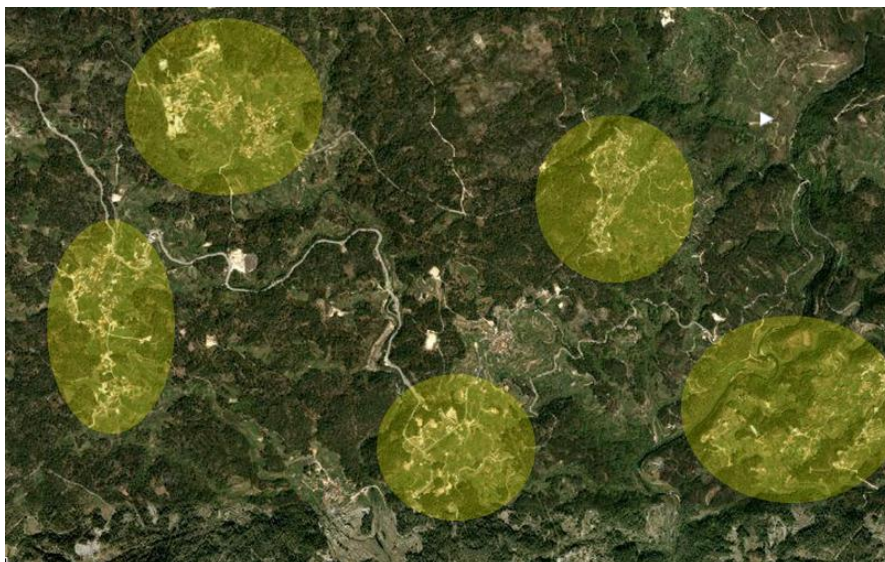


Figura 1 – Vista representativa de várias populações isoladas, ilustrando uma forma de distribuição não uniforme da população.

Serão apresentados possíveis modelos matemáticos, com vista a tornar possível a determinação da distância média a que o cliente se encontra da central local do operador de telecomunicações, de modo a possibilitar o cálculo do custo médio por cliente, com base na referida distância. Dos já existentes no mercado, os modelos criados diferenciam-se por apresentarem uma análise mais geral, ou seja, sem conhecer a localização concreta do cliente e dando várias hipóteses para o modo como a população se distribui na área de estudo.

Esta dissertação tem como principais objectivos a criação de um modelo geométrico e respectivas ferramentas de avaliação económica de modo a ser possível construir uma abordagem aos seguintes aspectos do projecto de uma rede FTTH – PON:

- incerteza inerente à adesão dos utilizadores e sua localização territorial;
- implicações do número de níveis de *splitting* e respectivos rácios;
- implicações do *link budget*
- avaliação financeira do projecto de investimento associado.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por 6 capítulos, referências bibliográficas e anexos, estruturados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Neste capítulo, é apresentado o enquadramento desta dissertação e os objectivos a cumprir.
- **Capítulo 2 – Organização das Redes de Telecomunicações:** São indicados os principais segmentos que constituem as redes de telecomunicação, assim como as diferentes tecnologias que permitem a sua implementação.
- **Capítulo 3 – Arquitecturas de Fibra Óptica nas Redes de Acesso:** Pretende-se nestas secções relatar o estado da arte, no que toca a tecnologias de fibra óptica no segmento de acesso.
- **Capítulo 4 – Parametrização da Distância OLT-ONU:** Referem-se todas as premissas necessárias para a obtenção de um valor de comprimento da fibra que ligará o utilizador à central local do operador, assim como modelos geométricos já existentes. São apresentadas as distribuições populacionais possíveis que serão tidas em conta, assim como outros pontos de decisão do operador.
- **Capítulo 5 – Análise Técnico-Económica de uma solução FTTH:** Avalia-se a viabilidade de uma solução FTTH, em relação aos parâmetros estudados no capítulo anterior. Será feita uma análise de sensibilidade a determinadas características, tanto geográficas como da rede.
- **Capítulo 6 – Considerações Finais:** Apresentam-se algumas conclusões gerais, resultantes do trabalho desenvolvido e as perspectivas de trabalho futuro.
- **Referências Bibliográficas.**
- **Anexos A, B e C** – Referente a cálculos matemáticos, processos probabilísticos, e distribuições populacionais para zonas rurais. Para consulta.

2. Organização das Redes de Telecomunicações

As actuais redes de telecomunicações são organizadas segundo o esquema apresentado na **Figura 2**, onde está claramente evidenciada a estruturação das mesmas em três segmentos distintos. Para cada um delas são usadas as seguintes diferentes tecnologias de estruturação, comutação e encaminhamento:

- Rede de Interligação ou Nuclear (do inglês *Core Network*)
- Rede de Acesso
- Rede do Cliente

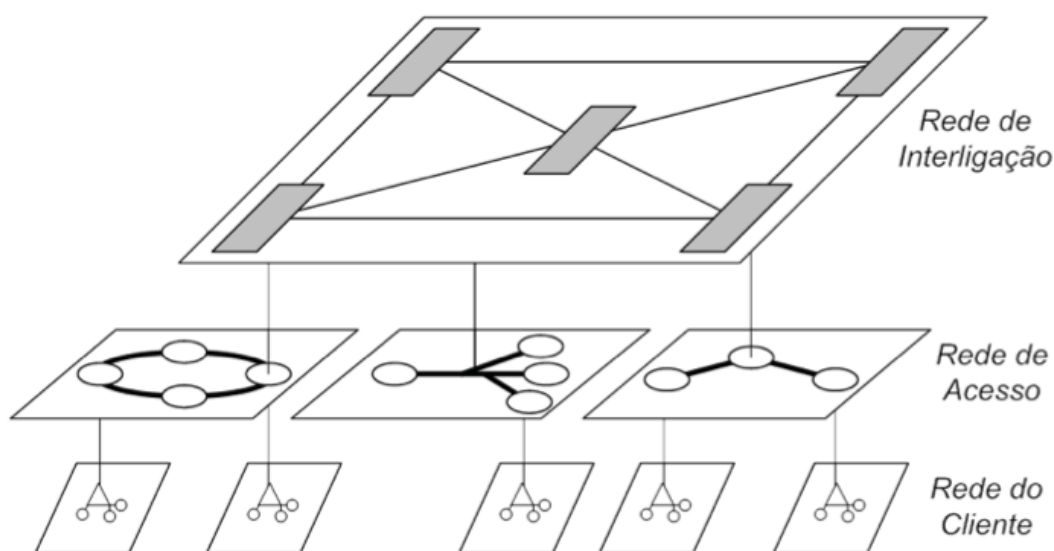


Figura 2 - Esquemática da organização das redes de telecomunicações [22].

Cada camada da rede possui, tal como já foi dito, tecnologias e procedimentos próprios, sendo que a **Figura 3** tem como objectivo representar exemplos dos serviços fornecidos por camada e suas tecnologias.

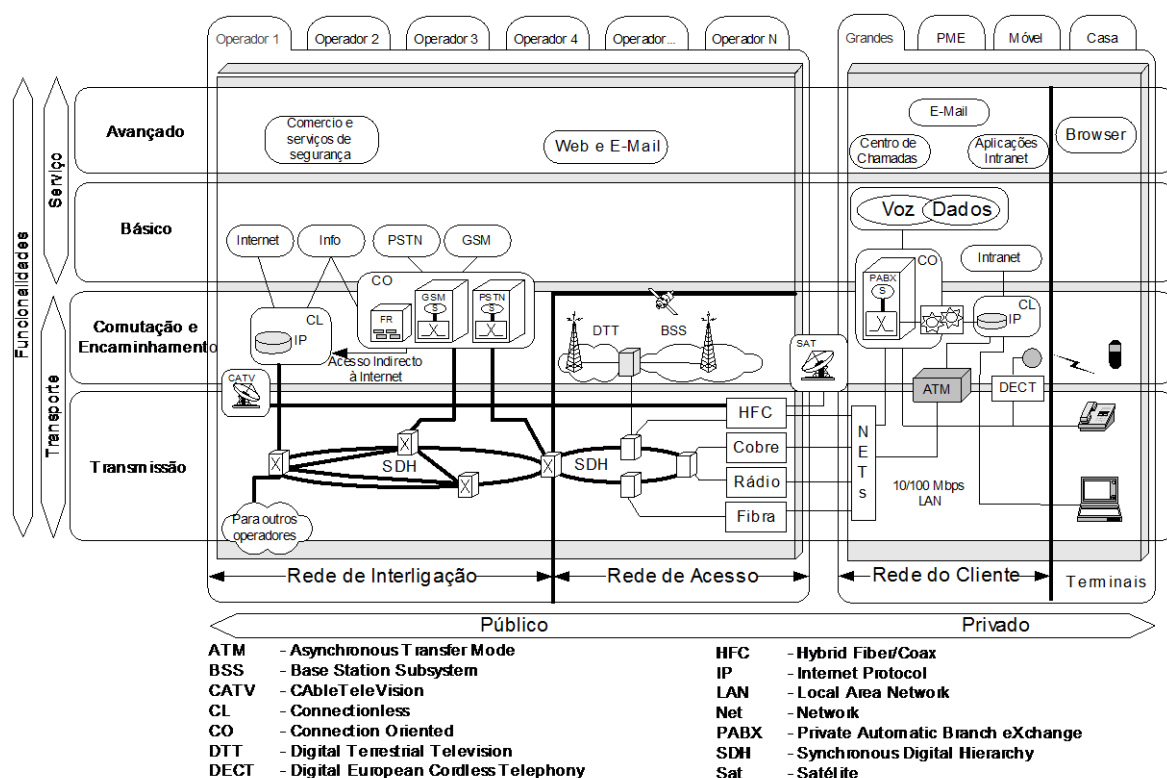


Figura 3 – Diferentes tecnologias e serviços utilizados actualmente nos diferentes segmentos de rede [22].

2.1 Rede Nuclear

A rede nuclear tem como principal função fornecer os mecanismos de transmissão, através dos quais é feita a interligação entre as várias redes de acesso. Esta camada de rede torna-se responsável por ligações de grande distância.

São diversas as topologias de rede que poderão ser encontradas na *Core Network* [36]:

- **Ligação ponto-a-ponto:** situação, em que apenas duas entidades intervêm, por exemplo entre centrais de comutação com ligações submarinas (entre continentes).
- **Ligação ponto-a-multiponto:** apenas uma consegue contactar com as outras estações (N-1) seja bilateral ou unilateralmente, como é o caso da rádio difusão. Poder-se-á dizer que há uma repartição de $1:N - 1$. Comum para redes de acesso a casas e empresas.
- **Ligação em rede ou malha (mesh):** cada nó N pode contactar com cada um dos restantes. São exemplo deste tipo de rede as LAN (*Local Area Network*) e MAN (*Metropolitan Area Network*).

- **Ligação anel (*ring*):** topologia, em que cada nó está ligado exactamente a dois outros nós de rede. Apresenta vantagens relativas à redundância, pois se uma ligação falhar, o nó não ficará isolado da restante rede.
- **Ligação em barramento (*bus*):** existe um caminho de rede principal (*bus*), onde estão ligados os vários nós secundários. Esta topologia poderá variar para uma topologia em **árvore**, se de cada nó secundário [2;N] sair uma ligação multiponto para diversas outros nós terciários.

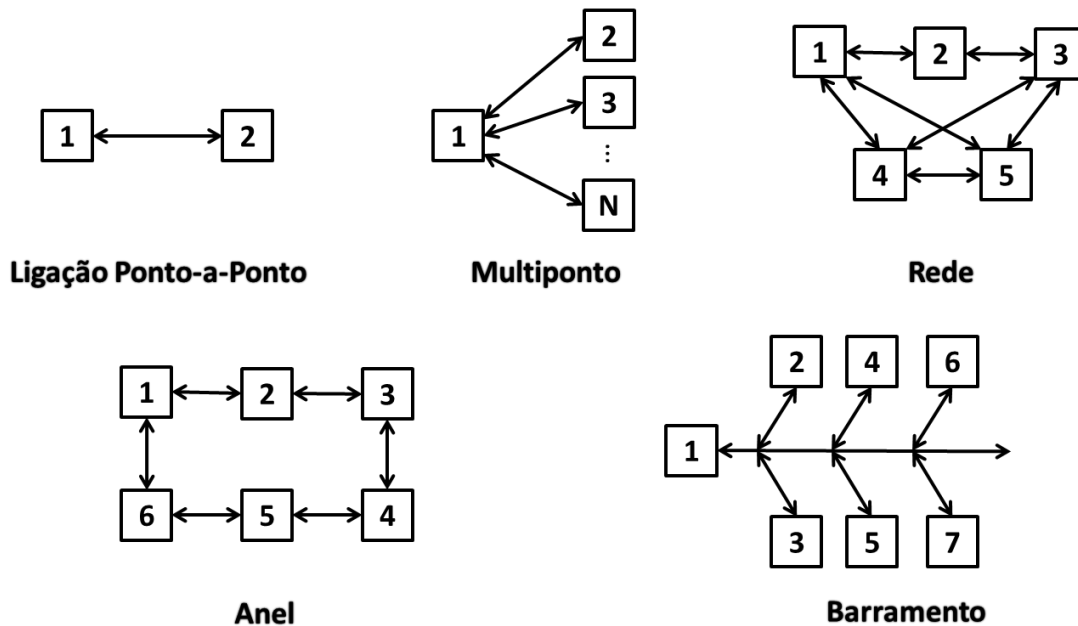


Figura 4 - Esquematisação das topológicas de rede mais comuns.

Enquanto algumas destas topologias foram posteriormente adaptadas para as redes de acesso de nova geração (redes em anel ou barramento), existem topologias que se mantêm exclusivas da rede nuclear, como é o caso das ligações ponto-a-ponto intercontinentais.

A nível físico as redes evoluíram desde redes não ópticas, em que os seus nós eram interligados por cobre, para redes parcialmente ópticas e, finalmente, redes totalmente ópticas. As grandes vantagens das redes ópticas passam pelas melhorias no ritmo de transmissão e a menor taxa de erros, pois as topologias mantiveram-se inalteradas, sendo que a cablagem de cobre foi substituída gradualmente por fibra óptica. Os tipos de equipamento activos, que encontramos na rede de interligação, são essencialmente *routers* e *switches*. Existe a tendência do processo de decisão de encaminhamento ser realizado cada vez mais no limite da rede *core*, mantendo os equipamentos principais mais livres para outras decisões. Como resultado desta tendência, apresentam-se cada vez mais *switches* nas instalações da *core network* com tecnologias SONET/SDH (*Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy*), DWDM (*Dense Wavelength-division Multiplexing*), ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e IP (*Internet Protocol*),

para as camadas de transporte e camada de rede. Para o *backbone* do segmento empresarial, são maioritariamente usadas tecnologias baseadas em Gigabit Ethernet ou 10G-Ethernet.

O SONET/SDH são protocolos de multiplexagem normalizados com a funcionalidade de fornecer conexões extremo-a-extremo entre nós da rede, através de comutação de circuitos. No caso específico de encontramos comutadores ATM nesses nós, a rede ATM trata a rede SONET/SDH como a sua camada de ligação. Contudo internamente a camada SONET/SDH comuta e encaminha ligações, multiplexa dados (que poderão ser ATM) e utiliza o meio físico de fibra óptica. Esta camada incorpora funcionalidades de rede, ligação de dados e física segundo a definição modelo OSI [36]. Possui um mecanismo eficiente para multiplexar ligações de baixo ritmo (por exemplo, 155Mbit/s), de modo a obter ligações de ritmo mais elevado (10Gbit/s ou 40Gbit/s), sendo estas transportadas de um modo mais eficiente pela rede, utilizando fibra óptica. Nos nós intermédios, o SONET/SDH disponibiliza um método eficiente para extrair fluxos de ritmos mais baixos, a partir de fluxos a ritmos mais elevados. Esta característica é conseguida com a utilização de um mecanismo de ponteiros. Esta camada de rede também garante um elevado grau de fiabilidade e disponibilidade, em que os operadores confiam que as suas redes tenham uma disponibilidade de 99,99% a 99,999% (com uma indisponibilidade a variar entre uma hora a cinco minutos por ano). Este objectivo é garantido com a implementação de mecanismos que consigam o rápido restauro do serviço no caso de avarias na rede [36].

Além do já referido, a rede *core* é tipicamente responsável por funcionalidades de:

- Agregação;
- Autenticação;
- *Switching*;
- *Charging*¹;
- *Service Invocation*²;
- *Gateway*.

Muitos dos operadores de telecomunicações têm as suas redes *core* interligadas. Algumas das grandes empresas mundiais possuem também a sua própria rede que está por sua vez ligada a uma rede pública.

¹ Esta funcionalidade trata do agrupamento e processamento de dados gerados pelos diferentes nós de diferentes redes. Os dois tipos mais comuns são: *prepaid charging* e o *postpaid charging*.

² A rede nuclear executa a tarefa de invocação de serviços para os seus subscritores. A invocação de um serviço pode acontecer com base em alguma acção concreta (como a transferência de uma chamada) ou a invocação de um serviço televisivo. De notar que a execução do serviço poderá ser, ou não, uma funcionalidade da rede nuclear sendo que os nós da rede de acesso poderão participar na referida execução.

2.2 Rede de Acesso

As redes de acesso são tradicionalmente responsáveis pela interligação do equipamento do cliente aos comutadores, localizados nas centrais locais (ou *Central Office*). Na **Figura 5** encontra-se ilustrado um exemplo de uma rede de acesso, com a utilização de tecnologia de fibra e divisores de rede passivos, que tem como função o transporte de serviços *triple-play* para clientes empresariais e residenciais.

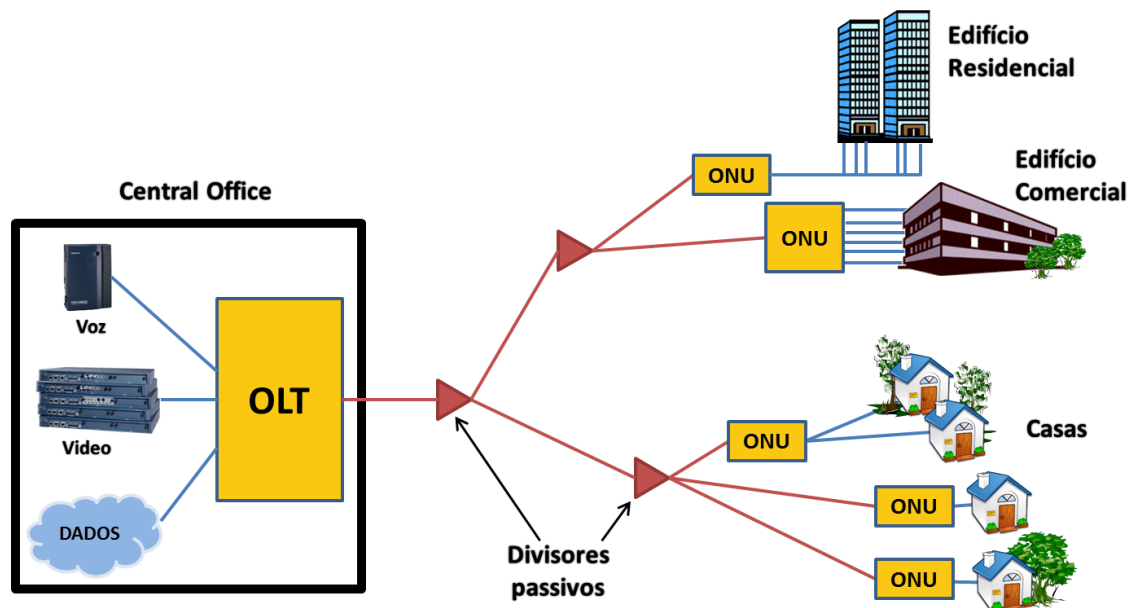


Figura 5 - Representação simplificada de uma rede de acesso, com tecnologia FTTH.

São cinco, os principais meios de transmissão físicos que poderão ser encontrados numa rede de acesso:

- **Par entrelaçado de cobre** – presente por exemplo nas redes telefónicas nacionais;
- **Cabo coaxial** – inicialmente planeado apenas para a transmissão de televisão, rapidamente evoluiu também para a transmissão de voz e dados;
- **Fibra óptica** – usada inicialmente apenas em transmissões de alto débito nas redes de interligação, surge agora como tecnologia predominante no segmento de acesso nas redes de nova geração;
- **Wireless (Transmissão em espaço livre)** – encontrada em redes telefónicas móveis e transmissões *broadcast* de TV ou rádio.

Actualmente, grande parte das infra-estruturas, que compõem este segmento de rede, são ainda de transmissão analógica, utilizando cabos de cobre coaxiais ou par entrelaçado. A conjugação deste factor com o constante aumento das necessidades de largura de banda por parte do utilizador final, é o grande responsável pelo actual estrangulamento de largura de banda, encontrado neste segmento de rede. Aparecem ainda os casos de clientes que fazem uso de tecnologias, para navegar na Internet, que não estariam programadas inicialmente para transmissão de dados, mas que foram adaptadas, devido à evolução de necessidades. Como exemplo desta situação, temos os cabos bifilares usados por tecnologias ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) ou o dial-up que usa a tradicional rede telefónica (com base no par entrelaçado de cobre), para transmitir dados.

Nos dias de hoje, os vários segmentos das redes de telecomunicações são formados por uma grande diversidade de componentes que suportam tecnologias variadas. Essas não são por vezes inter-compatíveis, o que leva a problemas dos mais diversos tipos. O que por vezes seria uma simples actualização de um pequeno segmento da rede, acarreta uma grande variedade de problemas, tal como falta inter-compatibilidade ou inter-acessibilidade, impedindo a troca rápida dos periféricos e tornando o investimento substancialmente superior.

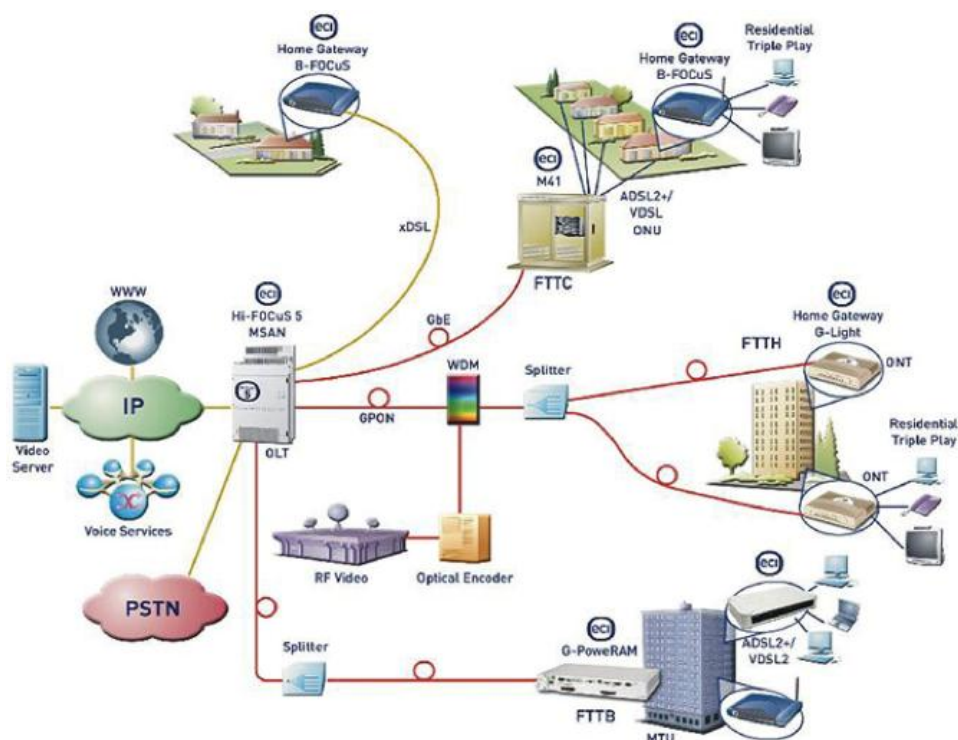


Figura 6 - Representação esquemática de diversas tecnologias da rede de acesso [31].

Actualmente, nas tecnologias já implementadas na rede de acesso, verifica-se alguma integração de serviços, nomeadamente nos casos da RDIS (Rede Digital com Integração de Serviços) e xDSL (*Digital Subscriber Line*) que usam o mesmo meio físico, o par entrelaçado de cobre. No que toca ao cabo coaxial, realiza-se a transmissão de dados e TV sobre o mesmo meio,

graças a normas como DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) que permite transferências de dados a alta velocidade sob a rede CATV (*Cable TV*) existente.

Também no caso do HFC (*Hybrid Fiber-Coaxial*), a fibra coexiste com o cabo coaxial, que está presente na *last-mile*, para transportar pacotes *Triple-Play* (TV, Internet e voz) para o consumidor.

As redes FTTx (Fiber To The x - ver [secção 3.1](#)) já são uma realidade nos dias de hoje, e existem diversas opções que os operadores deverão tomar, aquando da sua instalação, nomeadamente até quão próximo do cliente levarão a fibra, sendo usado par de cobre entrelaçado, cabo coaxial ou tecnologias sem fios, para a ligação do ponto de término da fibra até a casa do assinante. No caso do FTTH, o término da rede óptica encontra-se em casa do cliente, sendo visível um cabo de fibra à entrada de um equipamento ONT/ONU (*Optical Network Terminal* / *Optical Network Unit* - **Figura 7**).



Figura 7 - Equipamento ONT casa de um cliente FTTH.

No que diz respeito às redes sem fios, a transmissão de dados tem sofrido um tremendo aumento nos últimos anos. O crescente aparecimento no mercado de dispositivos móveis, *netbooks*, *smartphones*, *tablets* ou PDA (*Personal Digital Assistant*), com melhor capacidade de processamento, levou o cliente a querer aceder à Internet através do protocolo IP, em velocidades que o GSM (*Global System for Mobile Communications*) não conseguia fornecer. Com o aparecimento do GPRS (*General Packet Radio Service*), os serviços fornecidos pelo GSM eram estendidos, mas ainda não eram suficientes, devido às baixas taxas de transmissão que podem oferecer (de 56 a 114 kbit/s). O UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) surgiu para cobrir as novas necessidades do cliente, no que toca à taxa de transmissão, mantendo os serviços base do GSM/GPRS, sendo possível reutilizar uma série de equipamentos, minimizando assim em parte os custos de migração. Considerando já as velocidades de transmissão oferecidas pelo UMTS bastante razoáveis, comparando com os meios físicos, foram disponibilizados serviços

por parte dos operadores que dão uso a um *modem 3G (3rd generation mobile telecommunications)*, para acesso à Internet usando um simples computador pessoal com uma interface USB, podendo atingir taxas até *3,6Mbps*.

Surgiram mais tarde várias evoluções do *standard UMTS*, como é o caso do HSPA (*High-Speed Packet Access*) ou também denominado 3.5G, que dá uso às redes 3G existentes, dotando-as de uma velocidade de transmissão mais elevada. Tanto o UMTS como o HSPA conseguem uma interligação com outras redes, tais como as redes fixas de dados, permitindo ao utilizador uma constante migração entre as mesmas.

2.2.1 Rede Telefónica Fixa

A rede telefónica fixa foi criada com o objectivo inicial de permitir a comunicação por voz à distância sobre uma estrutura baseada em tecnologias que usam como meio físico o par entrelaçado de cobre. Inicialmente as redes não possuíam comutadores e as ligações eram feitas directamente entre os assinantes, utilizando um fio entre cada par de telefones. Para cada assinante era feita uma ligação ponto-a-ponto, sendo o destino escolhido manualmente (comutação manual). No entanto, com o evoluir dos tempos e a crescente procura deste serviço, foi necessário introduzir componentes que permitissem efectuar o estabelecimento destas ligações de uma forma mais prática, do que a comutação manual até então utilizada. Foram assim introduzidos os comutadores automáticos, que permitem a selecção automática do destino da chamada telefónica.

A arquitectura da rede telefónica fixa, que utiliza comutadores PSTN (*Public Switch Telephone Network*), é em estrela hierárquica (**Figura 8**). Quando o tráfego entre dois comutadores o justificar, são estabelecidas ligações directas entre eles, quer pertençam ao mesmo nível hierárquico, quer a níveis diferentes. Esta malha de ligações entre comutadores, transforma este tipo de rede em estrela numa rede híbrida estrela/malha (ver **secção 2.1**). O número de níveis hierárquicos depende de vários factores nomeadamente, do tamanho do país (caso seja a rede nacional) ou da densidade de utilizadores.

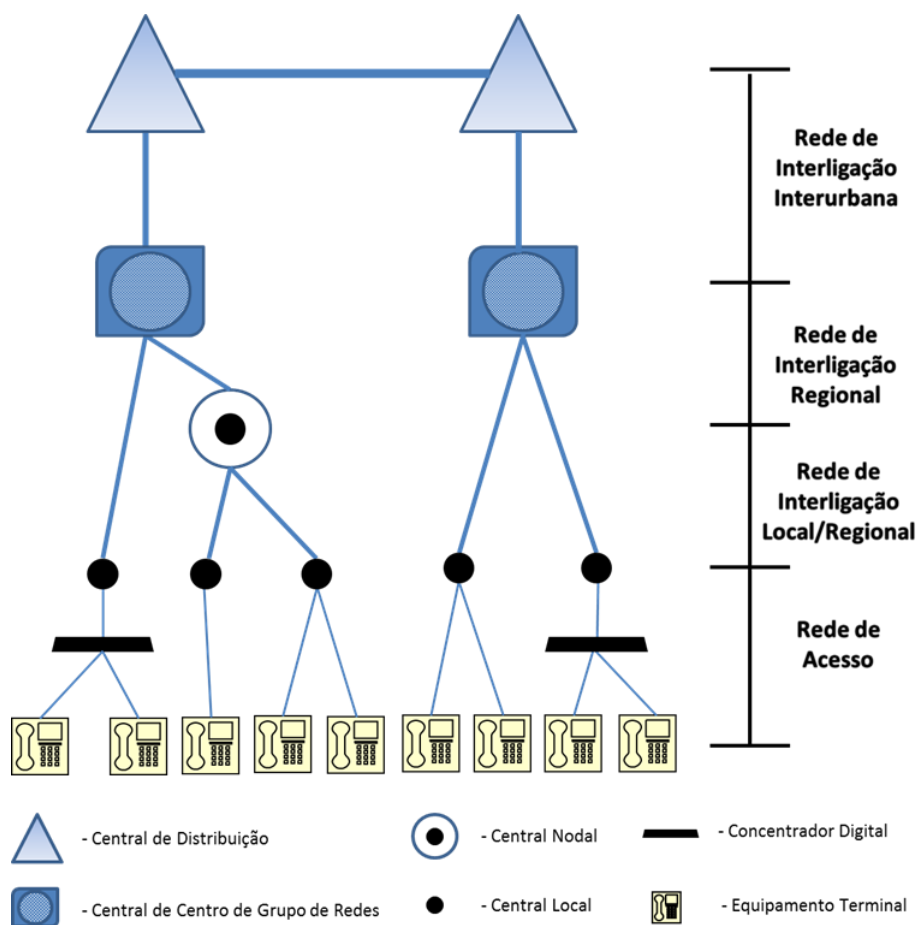


Figura 8 – Rede genérica das redes de telefone fixas. Adaptado de [22].

A rede telefónica fixa não se pode definir como uma rede exclusiva do segmento de acesso, resulta da interligação dos recursos existentes nas redes descritas anteriormente, ou seja, a rede de interligação, a rede de acesso e a rede do cliente.

Como já foi referido, a rede telefónica fixa necessitou de ser adaptada à evolução das necessidades. O Dial-Up (mais recentemente também denominada de Banda Estreita, em alusão à antítese de Banda Larga) é uma tecnologia que dá uso a um *modem* e à rede PSTN, para estabelecer uma ligação comutada a um ISP, que se encarrega de fazer o roteamento para a Internet ou outras redes de serviços. As velocidades de transmissão mais comuns deste tipo de serviços centram-se nos 56kbps. A rede telefónica de acesso digital é designada por RDIS ou, do original, ISDN (*Integrated Service Digital Network*). A RDIS criou condições para uma maior integração da rede, passando a ser possível transmitir tráfego de voz e dados, na mesma estrutura simultaneamente.

2.2.2 Rede xDSL

As redes *Digital Subscriber Line* surgiram com o objectivo de fazer melhor aproveitamento das infra-estruturas existentes de cobre da rede telefónica, numa altura em que as necessidades de transmissão de dados sofriam um rápido crescimento. Foram assim desenvolvidas técnicas de modulação e compressão espectral, capazes de transmitir débitos superiores até aos então existentes. Esta tecnologia permite estabelecer um circuito virtual permanente entre o utilizador e o fornecedor de serviços, disponibilizando uma maior taxa de transmissão.

São diversas as variantes que têm por base o xDSL, sendo as principais:

- IDSL (*ISDN Digital Subscriber Line*) – primeira recomendação do *International Telecommunication Union* - ITU (*Recommendation I.120*, 1984) relativo ao *standard* xDSL, e usado pela especificação ISDN nos primeiros projectos de implementação de rede telefónica digital para transmissão de dados;
- HDSL (*High-data-rate Digital Subscriber Line*) – foi o sucessor do IDSL, tendo sido desenvolvido para transmissões simétricas, permitindo velocidades de transmissão de 1,544 *Mbps* ou de 2,048 *Mbps* em cada sentido, usando para isso dois ou quatro pares de valas de cobre. Não permite a transmissão de voz sobre o mesmo troço, mas possibilita a utilização de toda a capacidade de transmissão do cobre para comunicações de dados;
- SDSL (*Symmetrical Digital Subscriber Line*) – também desenvolvido com base no IDSL, é semelhante ao HDSL com a diferença de ter transmissões simétricas no sentido ascendente e descendente.
- ADSL – é o primeiro *standard* xDSL vocacionado para o mercado global, permitindo uma transmissão assimétrica com velocidades que variam entre 1,5 *Mbps* até 9 *Mbps* no sentido descendente (*downstream*), e de 16 *Kbps* a 640 *Kbps* no sentido ascendente (*upstream*), em distâncias até 3 *km*. Utiliza apenas um par de cobre numa topologia ponto-a-ponto. Permite a transmissão de voz e de dados sobre a mesma infra-estrutura;
- ADSL2 – é uma variante do ADSL que se adapta melhor às necessidades dos utilizadores, permitindo um melhor desempenho, adaptação de débitos, alcance e diagnósticos de erros;
- ADSL2+ – é uma ligação que duplica a velocidade de transmissão usando o dobro do espectro, pode atingir taxas de 24 *Mbps*, no sentido descendente, e 3,5 *Mbps*, no sentido ascendente, reduzindo o alcance para cerca de 1,5 *Km*.

- VDSL (*Very-high-speed Digital Subscriber Line*) – permite velocidades de 13 *Mbps* a 52 *Mbps* no sentido descendente (*downstream*) e de 1,6 *Mbps* a 2,3 *Mbps* no sentido ascendente (*upstream*). Consegue taxas de transmissão superiores ao ADSL, mas tem ainda maiores limitações no que toca ao alcance;
- VDSL2 – foi a última tecnologia xDSL a ser lançada, cujo *standard* foi aprovado pelo ITU (G.993.2, 2006), sendo a mais avançada até a data. Pode atingir taxas até 100 *Mbps*, em ambos os sentidos até 0,5 *Km*, possibilitando serviços de voz, TV de alta definição e dados.

As velocidades neste tipo de ligações dependem, como foi visto, da distância entre o utilizador final e a DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*), pelo que terá que existir um compromisso entre a distância e a taxa de transmissão (**Figura 9**).

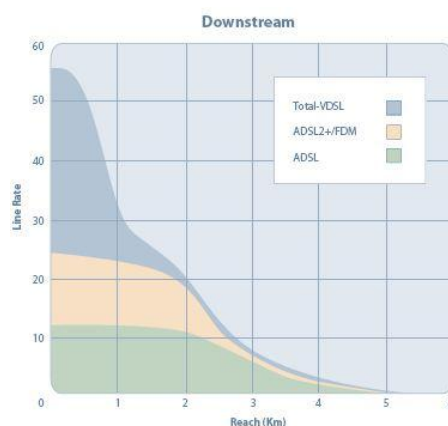


Figura 9 - Variação da taxa de transmissão (Mbps) com a distância (km) ao DSLAM, para três tecnologias xDSL mais comuns [25].

A DSLAM é um equipamento de rede que tem como objectivo dotar as ligações xDSL de uma maior velocidade no acesso à Internet e está localizado nas centrais de comutação telefónica do operador, onde concentrará o tráfego das redes xDSL e fará a sua interligação à rede de dados.

2.2.3 Redes CATV

As redes de cabo para TV tiveram origem nas *Community Antenna Television* onde, por imposição da distância, a transmissão de TV pelo meio livre estava limitada, tendo sido necessário construir antenas de grandes dimensões para recepção do sinal. Era usado um cabo de cobre, para ligar estas antenas comunitárias até casa do utilizador.

Estas redes tiveram enorme adesão e foram instaladas com o objectivo de distribuir sinais de vídeo. No entanto, tal como a rede telefónica, evoluiu para o fornecimento de uma maior variedade de serviços de telecomunicações. Inicialmente as redes de cabo eram do tipo *broadcast* (difusão), isto é, as comunicações realizavam-se apenas no sentido operador-cliente, e todos os utilizadores recebiam o mesmo sinal. A introdução dos serviços de dados obrigou as redes a possibilitarem comunicações nos dois sentidos e a comunicações independentes para cada assinante. Este objectivo foi alcançado com o aparecimento de técnicas para a optimização da utilização dos cabos já instalados, dando uso a uma maior gama de frequências. Em redes CATV, a largura de banda é partilhada por vários utilizadores os quais, quando acedem à rede em simultâneo, diminuem a largura de banda disponível para cada um.

A estrutura de uma rede de distribuição por cabo tem uma topologia em árvore, utilizando cabos coaxiais (nas zonas de distribuição) e fibra óptica (nos troços mais compridos da rede) - **Figura 10.**

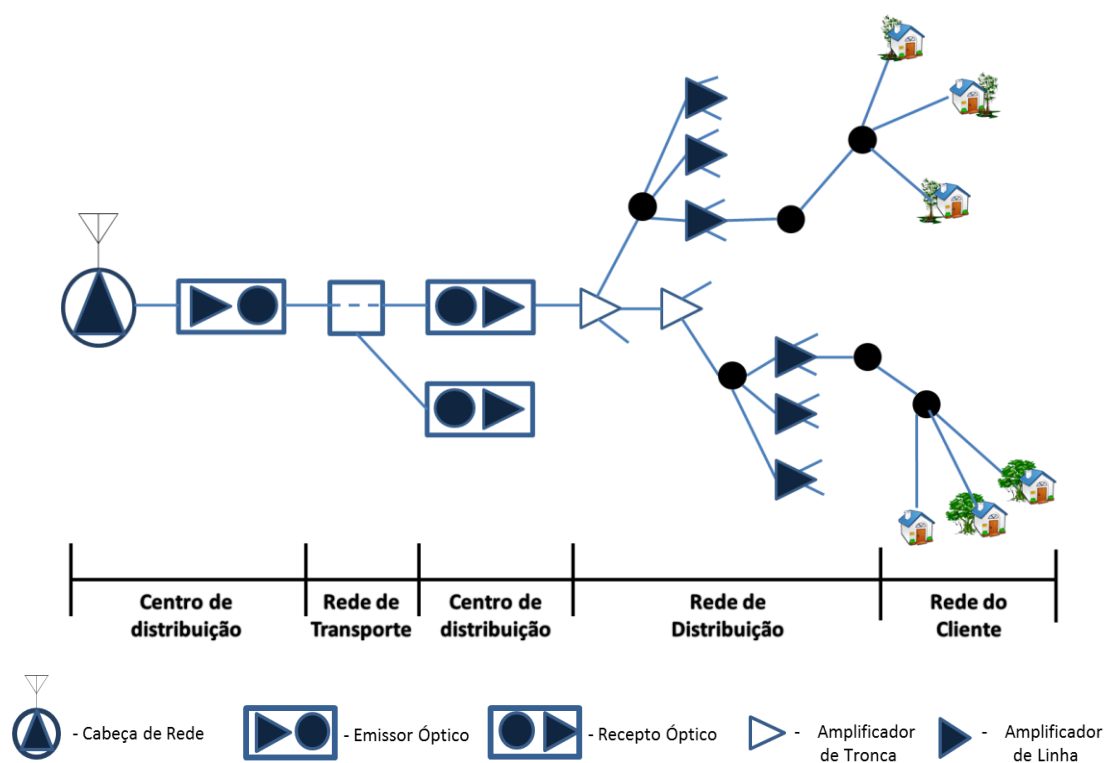


Figura 10 - Estrutura de uma rede de distribuição por cabo. Adaptado de [22].

O sinal é composto na cabeça de rede (*head end*), local onde são recebidos e processados os diversos canais a difundir pela rede. Os canais podem ter diversas origens tais como a recepção por satélite ou terrestre. O sinal é injectado pelo centro de distribuição para a rede de transporte (constituída por cabos de fibra óptica) até aos centros de distribuição locais, onde o sinal eléctrico passa para o cabo coaxial. Geralmente, cada cabo coaxial, que sai de um nó de distribuição, é utilizado para servir entre 500 a 2000 utilizadores [13]. Normalmente as redes que

utilizam este sistema tornam-se redes híbridas por também utilizarem o meio de fibra óptica em determinados segmentos. Na rede de distribuição, já em cabo coaxial, interliga os diversos receptores ópticos, situados nos centros de distribuição, com as saídas dos amplificadores de tronca ou de linha. Os amplificadores são dispostos de forma a compensar as atenuações sofridas pelo sinal ao longo do trajecto, de modo a que seja possível transportar o mesmo, ao longo de uma maior distância. Como são utilizadas frequências elevadas, a atenuação vai ser também bastante significativa, obrigando à instalação de amplificadores distanciados entre si na ordem das centenas de metros [13]. A rede do cliente corresponde à interligação, entre a saída dos amplificadores de tronca ou de linha, até à tomada em casa do cliente.

A infra-estrutura das redes de CATV pode assegurar o transporte de dados. Existem várias normas que definem o modo como o transporte de dados se realiza, entre as quais se destaca o DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) e as suas versões mais recentes (DOCSIS 2.0 e DOCSIS 3.0 e EuroDOCSIS). O ramo de telecomunicações do ITU (ITU-T) aprovou as diversas versões do DOCSIS como *standards* internacionais: DOCSIS 1.0 em *ITU-T Recommendation J.112 Annex B* (1998), DOCSIS 2.0 em *ITU-T Recommendation J.122* (2007) e DOCSIS 3.0 em *ITU-T Recommendation J.222*.

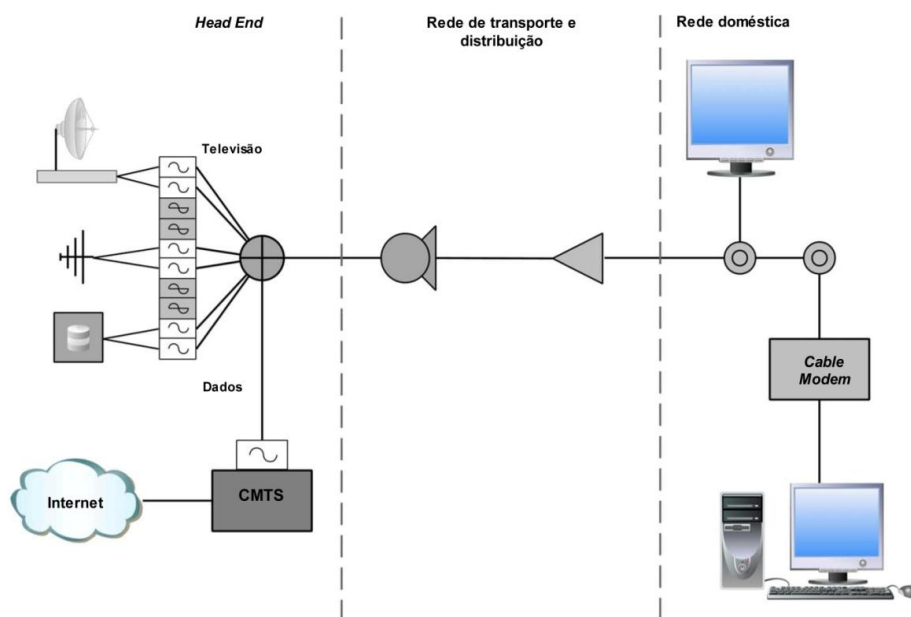


Figura 11 – Ligação DOCSIS [13].

O DOCSIS (**Figura 11**) é um sistema de comunicação ponto-a-multiponto entre o CMTS (*Cable Modem Termination System*) e os *cable modem* nas instalações do cliente. As tramas do sinal do cabo coaxial são injectadas em cabos de fibra óptica, de forma a conseguir atingir as distâncias necessárias desde o centro de distribuição primário ou *head-end*, onde se encontra o CMTS, até ao centro de distribuição, sendo o sinal óptico convertido em sinal eléctrico. O *cable modem* faz a interligação entre os equipamentos d cliente e a rede, realizando as operações de

modulação e desmodulação, e mecanismos de autenticação e segurança. O CMTS é o equipamento que multiplexa a informação em diferentes canais e acrescenta a encriptação, em tudo similar ao DSLAM nas redes xDSL, fazendo a ligação entre a rede de acesso e a rede de interligação. A rede óptica pode atingir até algumas centenas de quilómetros com a utilização de amplificadores ópticos. Geralmente, o ponto de distribuição local fica a 10 – 20 *km* do ponto de distribuição central, sendo que a distância máxima entre eles ronda os 160 *km*. O número de utilizadores, que uma célula pode servir, é imposto pelo ruído, atenuação e distorções introduzidos nos cabos e amplificadores [13]. A natureza partilhada da rede limita a largura de banda disponível para cada utilizador. Quanto maior for o número de utilizadores ligados à rede em simultâneo, menor será a largura de banda disponível por cada um desses utilizadores

Tal como se verifica nas redes xDSL, as redes CATV têm a vantagem de utilizar infra-estruturas passivas já existentes, reduzindo os custos de implementação. Neste trabalho será avaliado um cenário com a ausência de infra-estruturas e evidenciados os aumentos nos custos de implementação da rede, em comparação com um cenário onde já existem todas as infra-estruturas passivas necessárias.

2.2.4 Redes de fibra óptica

A primeira geração de redes, nas quais foram usadas fibras ópticas, surgiu nos termos dos anos oitenta para a rede *core*, onde as tecnologias ópticas usadas para transmissão eram: FDDI (*Fiber Distributed Data Interface*) para MAN a 100*Mbps* e ESCON (*Enterprise Serial Connection*) para SONET/SDH. No início dos anos noventa, foi iniciada a investigação com vista a melhorar as tecnologias existentes, não limitando as suas funções apenas à transmissão de dados. Surgiu, assim, a multiplexagem de comprimento de onda. Nas redes ópticas de primeira geração, a maioria dos estudos tinham como foco as aplicações das redes ópticas para LAN. Contudo os elevados encargos destas tecnologias, para as aplicações referidas, prejudicaram a utilização comercial de tais redes, mas mantendo de pé vários estudos nesta área.

Uma segunda geração de redes ópticas surgiu, também, no princípio dos anos noventa, com o aparecimento das primeiras redes com encaminhamento no comprimento de onda, sendo que componentes como OADM (*Optical Add Drop Multiplexers*) e OXC (*Optical Crossconnects*), tornaram este tipo de rede de comercialização viável, baixando drasticamente o seu custo de produção. Esta evolução teve como principal motivação as vantagens em termos económicos do encaminhamento por comutação de conexões de elevada capacidade no domínio óptico, por oposição ao domínio eléctrico. Paralelamente, foram desenvolvidas funcionalidades adicionais, com o objectivo de dotar a rede de capacidade para estabelecer e desligar caminhos ópticos, através da rede, de modo dinâmico, e capacidade de reencaminhar conexões ópticas rapidamente, em caso de avaria. Esta combinação de factores contribui para a introdução de

“redes ópticas inteligentes” com topologias em anel e malha, fornecendo caminhos ópticos a pedido e incorporando capacidades de restauro, para lidar com possíveis avarias da rede.

Com a modernização dos processos de fabrico e a redução dos custos dos mesmos, torna-se necessário aplicar as tecnologias que outrora eram usadas apenas para redes com grandes necessidades de débito, nomeadamente as redes *core*. As redes de fibra chegam assim ao segmento de acesso.

Existem enormes vantagens em construir uma rede totalmente em fibra óptica, nomeadamente as seguintes:

- A largura de banda numa rede óptica é quase ilimitada, em comparação com as redes actuais;
- A fibra é um meio com pouca atenuação e dispersão, permitindo grandes distâncias entre repetidores;
- Pequenas dimensões dos cabos de fibra e pouco peso (em comparação com os cabos metálicos), facilitando a sua instalação nas infra-estruturas já existentes;
- A fibra não sofre influência de campos magnéticos nem corrosão, ao contrário dos cabos coaxiais e dos pares de cobre entrançados, e não é afectada pelas condições meteorológicas, ou pelo relevo do terreno e edifícios, como acontece com as comunicações *wireless*.

A fibra óptica não requer, ao contrário do par entrelaçado e do cabo coaxial, dois condutores para transmissão do sinal. Cada cabo é constituído por um determinado número de fibras de vidro muito finas (**Figura 12** e **Figura 13**).

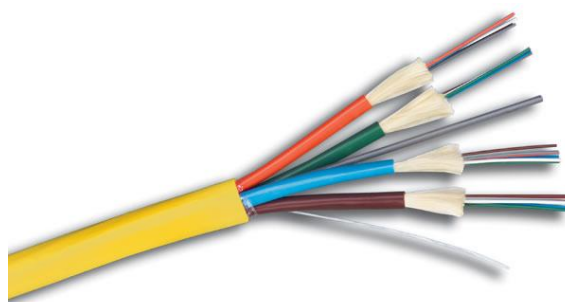


Figura 12 – Cabo contendo 76 fibras ópticas [29].

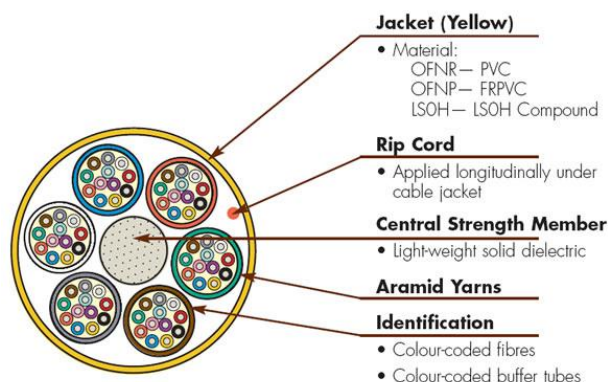


Figura 13 – Corte transversal a um cabo contendo 76 fibras ópticas [29].

Um cabo de fibra óptica é, assim, formado por um núcleo de fibra (com um diâmetro que poderá variar entre $8\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$), por onde as ondas electromagnéticas são guiadas, tendo este um índice de refração superior ao da bainha [51]. A diferença, entre o índice de refração do núcleo e da bainha, permite o confinamento das ondas electromagnéticas ao núcleo. A fibra tem um revestimento primário e um revestimento exterior que a protegem dos efeitos externos (**Figura 14**).

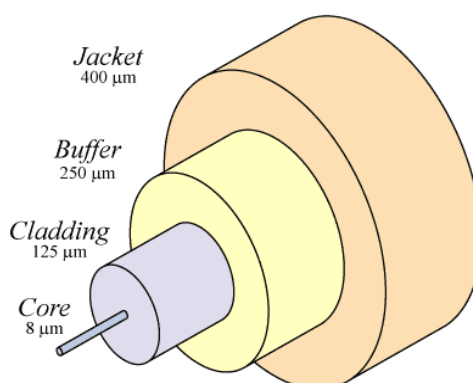


Figura 14 – Constituição do cabo de fibra óptica Erro! A origem da referência não foi encontrada..

As actuais arquitecturas de rede, que usam fibra óptica como meio de transmissão, serão alvo de uma análise mais detalhada no **Capítulo 3**.

2.2.5 Redes sem Fios

As redes sem fios caracterizam-se pelo uso do espectro electromagnético como meio de transmissão. Devido à existência do ruído inerente a este meio, tendo este características bastante diversificadas, é necessário que as tecnologias de transmissão sejam bastante robustas, no que diz respeito à detecção de erros. Estas redes podem não ser totalmente sem fios, uma vez

que as antenas utilizadas para transmissão estão muitas vezes interligadas por meios físicos, como fibra óptica ou cobre.

2.2.5.1 Difusão em espaço livre

As redes de difusão em espaço livre caracterizam-se pela capacidade de se dirigirem a vários utilizadores ao mesmo tempo (*broadcast*). Essa difusão pode ser para todos os utilizadores (não endereçada – Rádio ou Televisão) ou para um grupo restrito de utilizadores (endereçada).

O meio de transmissão utilizado, nos serviços de rádio, é o espaço livre, onde são utilizadas portadoras moduladas em FM (*Frequency Modulated*) ou AM (*Amplitude Modulation*), sendo transmitido um sinal rádio em cada uma destas portadoras. Estes sistemas têm evoluído de forma a apresentarem uma melhor qualidade, o que deu origem ao aparecimento da difusão digital de áudio (DAB – *Digital Audio Broadcasting*). A difusão digital suporta entre 6 a 17 estações de rádio por portadora, permitindo taxas de transmissão na ordem dos 1,5Mbps.

O sistema de difusão de televisão em espaço livre, utiliza sinais de radiofrequências (RF) nas bandas VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). Os sinais provenientes do emissor, são enviados até ao utilizador através de transmissões locais, que recebem o sinal, amplificando-o e retirando-lhe o ruído proveniente da amplificação, reenviando-o para outros transmissores. A difusão de televisão tinha inicialmente um problema quanto à franca cobertura, tendo actualmente sido resolvido através da utilização de um sistema complementar de transmissão de sinais de televisão via satélite. Outra evolução foi a digitalização da transmissão (DTT – *Digital Terrestrial Television*, ou do português TDT – Televisão Digital Terrestre). A televisão digital é transmitida recorrendo a sinais de rádio frequência, da mesma forma que a televisão tradicional, permitindo, no entanto, a recepção de múltiplos canais numa única gama de frequências.

2.2.5.2 Redes Celulares Móveis

Uma rede celular móvel é aquela que usa um transmissor fixo (*base station*), para enviar sinais rádio para uma determinada área denominadas células. Quando juntas, estas células conseguem fornecer cobertura a grandes áreas geográficas (**Figura 15**). Podem servir um largo número de receptores portáteis, como telemóveis, permitindo a ligação entre os mesmos, estejam eles em qualquer local da rede ou mesmo em movimento entre células durante a transmissão.

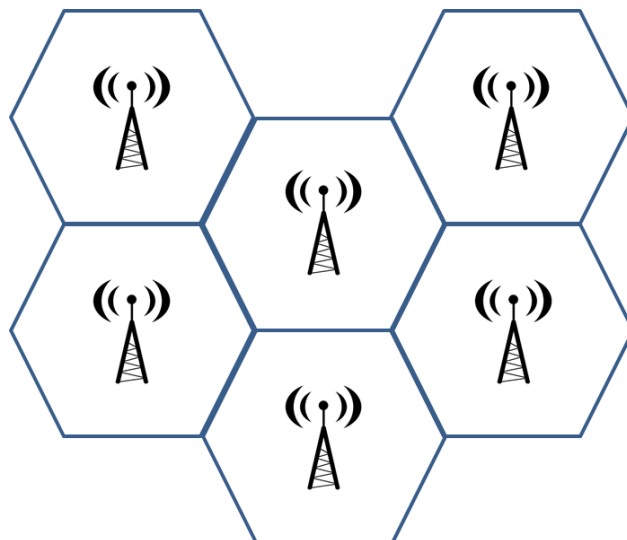


Figura 15 – Exemplo de uma rede celular.

Estas redes oferecem os seguintes benefícios em relação a outras redes:

- Elevada capacidade;
- Baixo consumo eléctrico;
- Larga cobertura;
- Interferência reduzida com outros sinais.

2.2.5.2.1 GSM / GPRS

As redes telefónicas com base em tecnologias *Global Systems for Mobile communications* e *General Packet Radio Services*, são redes celulares móveis, sendo as mais utilizadas na Europa. Os serviços de voz e de mensagens SMS (*Small Messages Service*) asseguraram o sucesso das redes GSM, ao passo que o serviço de dados é pouco utilizado. O sistema GSM fez a sua evolução, transitando da tecnologia analógica para a digital, donde resultaram melhorias na segurança, robustez e fiabilidade. O sistema GSM 900 utiliza dois conjuntos de frequências na banda dos 900 MHz: o primeiro nos 890 – 915MHz, utilizado para as transmissões do terminal, e o segundo nos 935 – 960MHz, para as transmissões da rede.

O método utilizado pelo GSM, para gerir as frequências, é uma combinação de duas tecnologias: o TDMA (*Time Division Multiple Access*) e o FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). O FDMA divide a frequência disponível (25 MHz) em 124 canais com uma largura de 200 KHz com uma capacidade de transmissão de dados na ordem dos 270 Kbps. A cada estação-base é atribuído um canal de frequência que é dividido novamente, desta vez no tempo, utilizando o TDMA, em oito *timeslots*. O terminal utiliza um *timeslot* para recepção e outro para

emissão. Estes encontram-se separados no tempo, para que o telemóvel não receba e transmita ao mesmo tempo. Esta divisão de tempo é denominada *full-rate*. As redes também podem dividir as frequências em 16 espaços, processo designado como *half-rate*, sendo a qualidade da transmissão inferior.

O GPRS é uma tecnologia sem fios de transmissão de dados por pacotes e uma evolução da rede GSM, colmatando algumas das suas desvantagens. Esta tecnologia fornece um serviço que permite que a informação em forma de dados, seja emitida ou recebida através de uma rede de telefones móveis. A rede GPRS mantém a maioria dos equipamentos da rede GSM e funciona como um complemento a esta rede, proporcionando-lhe serviços de dados, passando a existir duas redes em paralelo: uma que continua a assegurar os serviços baseados em circuitos (serviços e voz), e a outra que faz o encaminhamento das ligações de pacotes. Este sistema consegue obter taxas de transmissão até 171 Kbps.

Um *upgrade* de uma rede GSM para GPRS permite manter os periféricos, sendo apenas necessário efectuar um *upgrade* aos mesmos: BSC (*Base Station Controllers*), servidor MSC (*Mobile Switching Center*), HLR e VLR (*Home and Visitor Location Register*), assim como os *links* de transmissão da BTS (*Base Transceiver Station*), ou simplesmente BS (*Base Station*), para a BSC e da BSC para o servidor MSC. Existem, como é óbvio, componentes adicionais que são necessários instalar na BS: TRX (transmissores) e *packet subsystems*.

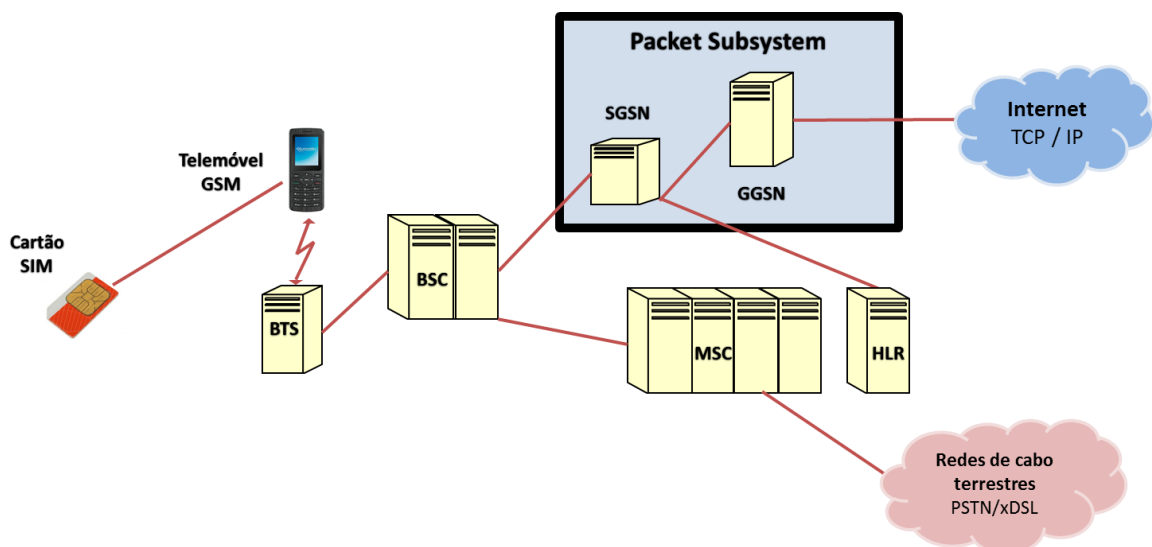


Figura 16 – Componentes essenciais de uma rede GPRS. Adaptado de [34].

O *packet subsystem* é composto por um conjunto de equipamentos que fornece as funcionalidades necessárias para o tráfego orientado por pacotes. São necessários componentes tais como [34]:

- SGSN (*Serving GPRS Support Node*) – ligado a um, ou mais, BSC, é responsável pela gestão de comunicação de dados, do tráfego e da informação de facturação. Necessita de um SGSN por cada 100.000 clientes;
- GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) – responsável pela interconexão com outros tipos de rede (por exemplo IP ou X25), pelas *firewall*, facturação e funções de informação de encaminhamento. É necessário um GGSN por cada 100.000 clientes;
- DNS (*Domain Name Server*) – sistema que gere uma base de dados e que atribui endereços IP. Tem um rácio de um por cada SGSN;
- HLR (*Home Location Register*) – sistema que recebe e processa directamente transacções e mensagens MAP (*Mobile Application Part*). É necessário um SGSN por cada 100.000.000 clientes.
- BTS (*Base Transceiver Station*) – conjunto de *hardware* responsável pela ligação da rede telefónica móvel ao terminal do cliente.
- MSC Server (*Mobile Switching Center Server*) – elemento da rede nuclear móvel que controla o *switching* do subelementos da rede.

2.2.5.2.2 Terceira Geração de Rede Móvel (3G)

A sigla 3G refere-se à terceira geração de padrões e tecnologias telefónicas móveis, substituindo o 2G (GSM/GPRS). É baseado na família de normas do ITU, no âmbito do Programa Internacional de Telecomunicações Móveis (IMT-2000). As redes celulares móveis foram actualizadas, de forma a utilizarem as tecnologias 3G desde 1999, aquando da padronização das diversas tecnologias 3G.

As tecnologias 3G permitem às operadoras da rede móvel oferecerem aos seus subscritores uma ampla gama de serviços, já que possuem uma maior capacidade largura de banda por causa da melhoria na eficiência espectral. Entre os serviços, destaca-se a transmissão de voz de dados a longas distâncias, mantendo o ambiente móvel. Ao contrário das redes definidas pelo padrão Wi-Fi, que são de curto alcance e largo consumo energético, as redes 3G evoluíram para incorporar as redes de acesso, permitindo acesso à Internet em alta velocidade e videochamadas.

Com a globalização das redes 3G, uma organização denominada *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), deu seguimento ao trabalho de padronização levado a cabo pelo ITU. O resultado desse trabalho foi o aparecimento da tecnologia 3G mais usada a nível global – UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*).

O UMTS utiliza tecnologias de WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) ou CDMA2000 (*Code Division Multiple Access*), para oferecer melhor eficiência espectral e de alocação de largura de banda as redes móveis. Esta tecnologia permite uma fácil interligação com

outros sistemas de telecomunicações, tais como a PSTN ou uma rede de dados, possibilitando, assim, ao utilizador movimentar-se para diferentes ambientes.

Tal como o *upgrade* do sistema GSM para GPRS, um sistema UMTS pode ter por base um sistema de comunicações móveis já existente. Quando tal acontece, ter-se-á um equipamento de rádio capaz de acomodar sistemas como GSM, GPRS, EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) e UMTS ao mesmo tempo, de modo a facilitar a passagem de GSM para UMTS. O referido sistema encontra-se representado na **Figura 17** sendo que, se fosse considerado um sistema UMTS simples (sem os componentes necessários para integrar outras tecnologias), as BTS e BSC de GSM não estariam presentes.

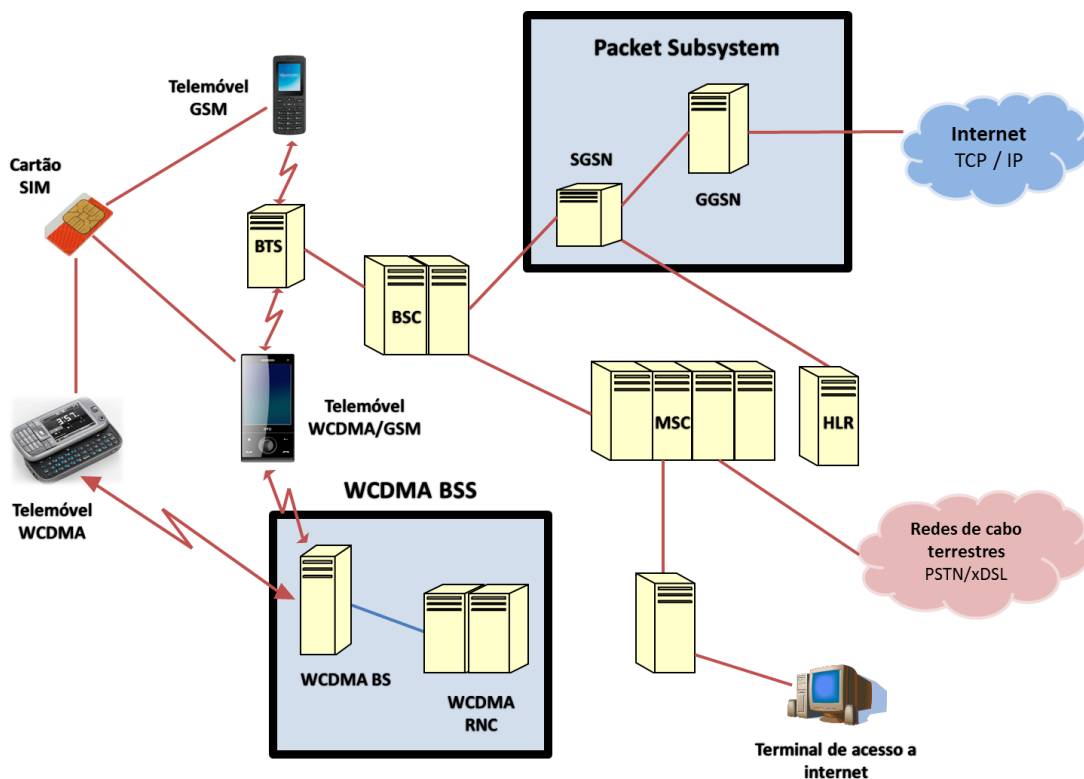


Figura 17 - Arquitectura de um sistema UMTS. Adaptado de [34].

Salienta-se os seguintes componentes, essenciais para uma rede UMTS:

- BSS (*Base Station Subsystem*) – cada estação base possui vários sectores com 5 MHz a 15 MHz cada (um BSS por cada estação base). A BSS engloba os serviços de *Node B* (*Base Station* da tecnologia UMTS) e RNC;
- RNC (*Radio Network Controllers*) – fornece apoio à gestão das chamadas de dados, do tráfego e da informação de facturação (um por cada 256 estações base).

- *Node B* – equivalente à BTS, referida na figura. É conjunto de hardware responsável pela ligação da rede telefónica móvel ao terminal do cliente. Em relação à *Base Station* GSM, o *Node B* usa WCDMA/TD-SCDMA (*Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*) como tecnologias de transmissão sem fios. Como nas redes celulares GSM, também o *Node B* das redes UMTS contém um, ou mais, transmissores e receptores usados para comunicar directamente com os dispositivos móveis (sendo que estes não comunicam directamente entre si).
- *MSC Server (Mobile Switching Center Server)* – elemento da rede nuclear móvel que controla o *switching* do subelementos da rede.
- *SGSN (Serving GPRS Support Node)* – ligado a um, ou mais, BSC, é responsável pela gestão de comunicação de dados, do tráfego e da informação de facturação. Necessita de um SGSN por cada 100.000 clientes;
- *GGSN (Gateway GPRS Support Node)* – responsável pela interconexão com outros tipos de rede (por exemplo IP ou X25), pelas *firewall*, facturação e funções de informação de encaminhamento. É necessário um GGSN por cada 100.000 clientes;
- *HLR (Home Location Register)* – sistema que recebe e processa directamente transacções e mensagens MAP (*Mobile Application Part*). É necessário um SGSN por cada 100.000.000 clientes.

O dimensionamento de sistemas deste género é feito calculando o alcance máximo de transmissão da estação base e a capacidade máxima que garante a conexão dos utilizadores com uma determinada taxa de transmissão, sendo considerado válido o menor destes dois. De modo a garantir cobertura, torna-se necessário proceder ao cálculo do raio da célula, através de um *link budget* representativo do *uplink*, onde os equipamentos móveis são mais limitados, no que toca à potência, do que às estações base. Este raio irá variar consoante a morfologia da zona em que nos encontramos, ou seja, será fortemente influenciado por factores como a densidade populacional ou o tipo de obstáculos existentes na transmissão (árvores, edifícios, etc.).

A tecnologia HSPA foi desenvolvida para cobrir uma falha existente nas redes UMTS, ou seja para fazer a ligação entre a rede móvel 3G e os serviços de Internet, permitindo sobrepor os vários protocolos que possibilitam uma comunicação por dados à alta velocidade, para vários utilizadores servidos pela mesma célula. Embora esta tecnologia consiga larguras de banda na ordem dos 14 *Mbps* (21 *Mbps* para o mais recente standard, HSPA+ ou *Evolved HSPA*), os

utilizadores raramente obtêm as larguras de banda esperadas (desde de 1Mbps até 21,6 Mbps), devido ao elevado factor de concentração³ necessário para que esta tecnologia seja rentável.

2.2.5.2.3 LTE

A tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), normalizada pela versão 8 do 3GPP, tem como objectivo assegurar a continuidade competitiva dos sistemas 3G. Apesar de o LTE ser normalmente considerado uma tecnologia de quarta geração móvel (4G), as suas características não cumprem os requisitos necessários do protocolo IMT *Advanced* (*International Mobile Telecommunications Advanced*) do ITU. Foi assim considerada uma tecnologia pre-4G, e um “passo” crucial a ser dado rumo a nova geração de redes móveis. O LTE veio proporcionar as seguintes principais melhorias:

- Maiores velocidades de transmissão e maior qualidade de serviço;
- Sistema optimizado para comutação de pacotes;
- Redução no investimento necessário para a criação da rede e nos seus custos operacionais;
- Baixa complexidade;
- Evitar a fragmentação desnecessária de sistemas emparelhados (e não emparelhados) com a mesma frequência de operação.

Existem dois tipos de implementações possíveis para esta tecnologia:

- LTE puro – é implementada uma rede cuja única função é transportar tráfego de dados, isto é, para efectuar ligações de voz torna-se necessária a utilização de técnicas como VoIP. Esta solução necessita de uma infra-estrutura bastante simples, não sendo necessária a presença de RNC, ligando directamente os *NodeB* à rede nuclear.
- LTE over GSM – é implementada uma rede LTE sobre uma rede GSM já existente, o que traz duas vantagens significativas. A infra-estrutura da rede GSM é completamente aproveitada sendo necessário, como é óbvio, actualizar alguns

³ Este factor relaciona-se com o facto de que os utilizadores das redes sem fios nem sempre estão a usufruir do serviço, podendo dividi-los em grupos com diferentes prioridades e atribuindo-lhes factores de contenção variados. Fazendo um estudo detalhado do uso da tecnologia sem fios que se pretende oferecer e da população que usufrui do serviço, é possível servir um maior número de clientes realizando o mesmo investimento.

componentes. A rede GSM mantém-se activa, podendo ser utilizada para encaminhar o tráfego de voz.

A **Figura 18** ilustra a topologia da rede descrita na primeira solução. A topologia da segunda solução é idêntica a uma rede UMTS, pelo que pode ser observada na **Figura 17**.

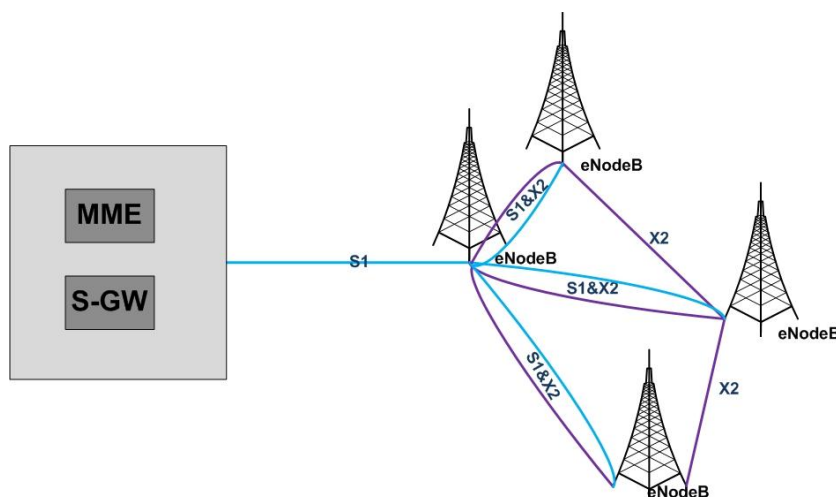


Figura 18 - Arquitectura LTE (*data only*) [11].

O LTE *Advanced* foi normalizado pelo 3GPP e já foi considerado pelo ITU como um sistema 4G (embora ainda não exista no mercado). Surgiu para cumprir todos os requisitos em falta no LTE, para ser considerada uma tecnologia de quarta geração móvel, mantendo a retrocompatibilidade com os sistemas LTE já existentes.

2.2.5.2.4 WiMAX

A tecnologia WiMAX (*World Wide Interoperability for Microwave Access*), baseado na norma conhecida como IEEE 802.16, é um sistema de comunicação digital sem fios, tendo como objectivo possibilitar a criação de WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). A norma que define o WiMax inclui duas camadas (**Figura 19**): a camada 1 (*PHYSICAL*) e a camada 2 (Medium Access Control – MAC). Inclui aplicações NLOS (*Non Line of Sight*) na banda de 2Ghz a 11Ghz, usando OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

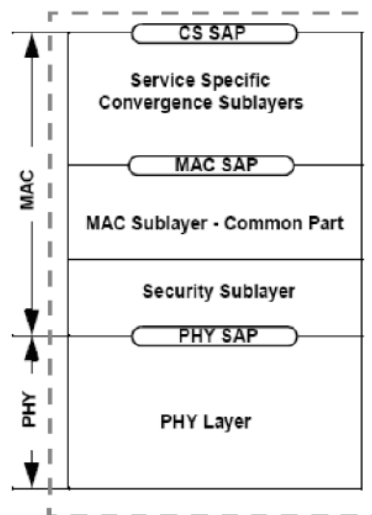


Figura 19 – Camadas da norma 802.16 (PHY e MAC) [8].

Usando o perfil de sistema baseado na camada física da norma 802.16-2004 (ou 802.16d, uma variante do IEEE 802.16) OFDM, com topologia ponto-a-multiponto ou *mesh* (*Mesh MAC Layer*), e a possibilidade de TDD (*Time Division Duplexing*) ou FDD (*Frequency Division Duplexing*), o WiMax possui um alcance muito superior ao Wi-Fi, pois gere mais eficientemente as frequências, o que permite a utilização de potências de transmissão mais elevadas. Também no Wi-Fi os computadores estão ligados através de uma placa WLAN até *access point* mais próximo, o que não se verifica nas ligações WiMax. Nesta tecnologia existe duas partes distintas (**Figura 20**):

- WiMax *Base Station* - é constituída por uma torre com uma antena WiMax e funciona de modo similar à BS das redes GSM e UMTS. As antenas NLOS poderiam, em teoria, servir até um raio de 50km, mas devido a certas limitações geográficas apenas atinge um raio de 10km. A rede WiMax também possui antenas LOS (Line of Sight) para ambientes em que seja possível a transmissão dos sinais *wireless* sem qualquer interferência de obstáculos, na faixa de frequências de 10 a 66Ghz. Estas antenas tem a vantagem de uma melhor transmissão e um custo reduzido em relação as antenas NLOS.
- Receptor WiMax - do outro lado da comunicação encontra-se o receptor WiMax.

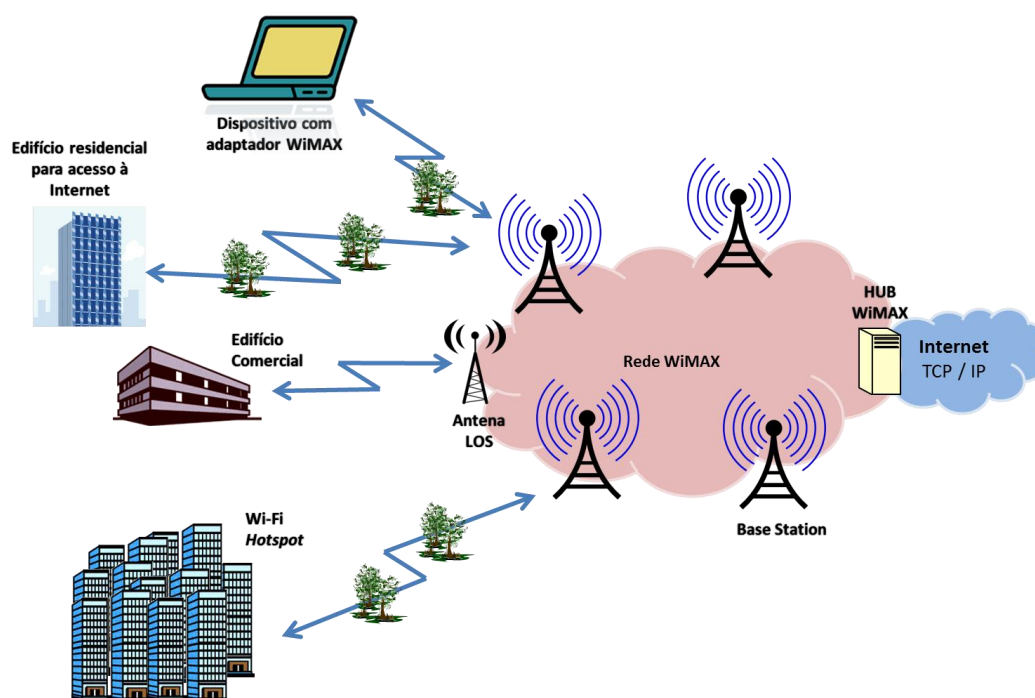


Figura 20 – Rede WiMax.

Uma WiMax BS pode estar ligada a outras BS através de uma ligação de alta velocidade (*WiMax Backhaul*) e as ligações entre transmissor e receptor poderão ser feitas mesmo em movimento (da parte do receptor). Esta tecnologia suporta protocolos como ATM, IP, Ethernet, etc..

Pretende-se também, com esta tecnologia, encontrar uma solução móvel que combine o melhor de dois mundos: mobilidade e velocidade. A **Figura 21** mostra a função mobilidade – velocidade para diferentes tecnologias de acesso móvel, das quais se destaca a maior velocidade do WiMax em relação ao HSPA, UMTS e GSM e a mobilidade que o Wi-Fi, combinando o melhor das referidas tecnologias (mesmo não atingindo as taxas de transmissão do Wi-Fi e a mobilidade das tecnologias HSPA, UMTS e GSM), provando ser uma solução *future proof*.

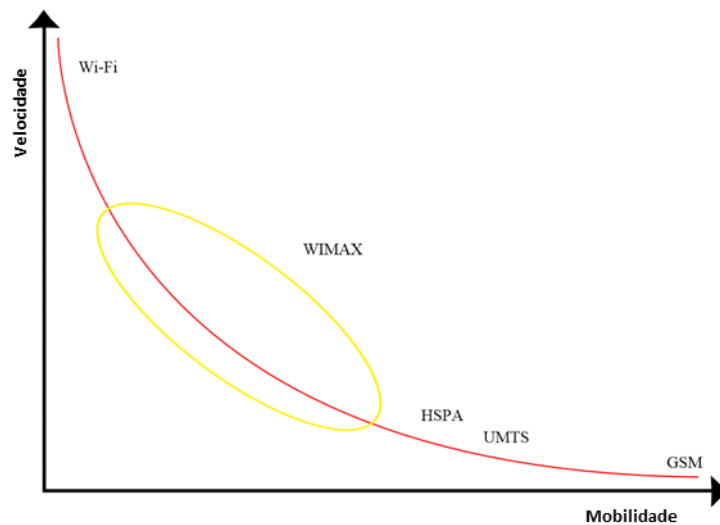


Figura 21 – Relação Mobilidade – Velocidade. Adaptado de [53].

O WiMAX possui a capacidade de transmitir informação em várias modulações, consoante o *bit error rate* máximo tolerado, permitindo aos utilizadores aceder a serviços de Internet, com uma largura de banda comparável às tecnologias xDSL. O protocolo, que serve de base a esta tecnologia, consegue um uso mais eficiente dos canais, diminuindo as interferências e permite transportar tráfego de elevado débito através de longas distâncias.

2.3 Rede do Cliente

A rede do cliente é o segmento de rede do edifício ou da localização, onde o cliente se encontra e possibilita a interligação entre o equipamento terminal e a rede de acesso. São várias as tecnologias ao nível da camada física que poderão ser encontradas nestes últimos metros da rede: IEEE802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.3 (Ethernet), feixes hertzianos (no caso da rede telefónica móvel), fibra óptica no caso de uma rede FTTH, o cabo coaxial nas CATV e HFC e o par entrelaçado nas xDSL. A escolha da tecnologia a usar irá variar com diversos parâmetros, como a distância a percorrer, o número de utilizadores a servir e, ainda, como é óbvio, a utilidade que se pretende dar à rede, seja uma rede telefónica, TV, de dados ou a combinação destes.

A regulação do sector das telecomunicações pressupõe a actuação da ANACOM (Autoridade Nacional de Comunicações) no que toca à instalação de infra-estruturas de telecomunicações tanto em edifícios, incluindo a respectiva ligação às redes públicas (ITED), como em loteamentos, urbanizações e conjuntos de edifícios (ITUR).

3. Architecturas de Fibra Óptica nas Redes de Acesso

No capítulo anterior, foi apresentada uma visão sucinta do estado actual das redes de telecomunicação. O presente capítulo será orientado para as soluções de rede que recorrem à utilização de fibra óptica. Nele pretende-se apresentar as arquitecturas FTTx e tecnologias de rede óptica activa e passiva.

3.1 Architecturas FTTx

A topologia FTTx é a representação genérica para designar toda a variedade de arquitecturas que utilizam fibra na rede de acesso. Dependendo do ponto de término da fibra, a arquitectura de rede terá diferentes terminologias. As arquitecturas mais comuns estão representadas na figura seguinte.

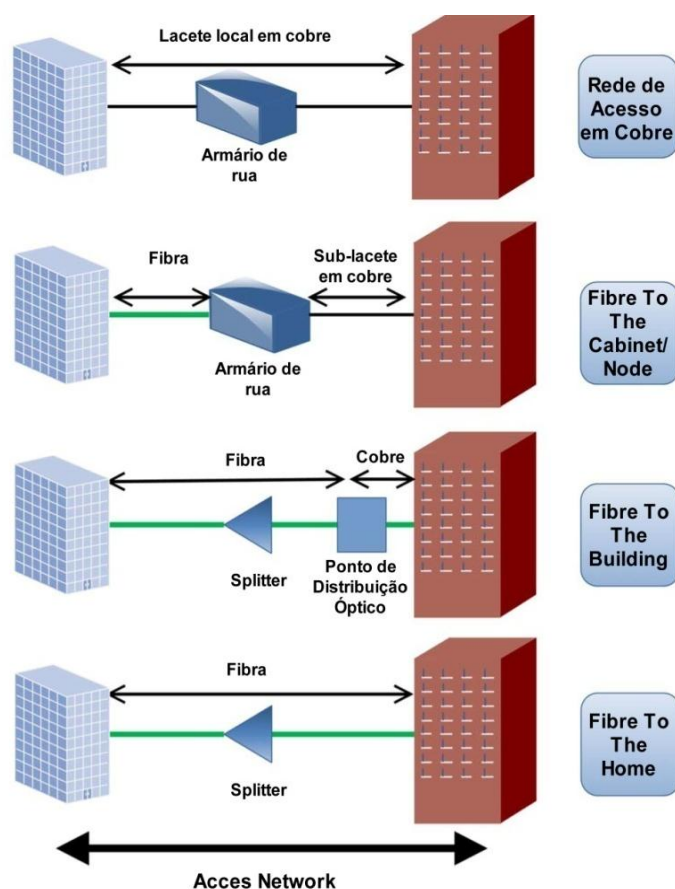


Figura 22 – Principais terminologias FTTx [13].

Da figura retiram-se as arquitecturas seguintes:

- **FTTN** (*Fiber To The node*) é a arquitectura, onde a fibra termina no armário de rua. Neste caso são usadas as tecnologias existentes (par entrelaçado ou coaxial), para levar a rede até à casa do cliente. A área coberta por esta arquitectura é normalmente inferior a $1500m^2$, mas poderá abranger até algumas centenas de clientes. Para os casos, em que o armário de rua se situa até 300m dos clientes, poderemos considerar a arquitectura **FTTC** (*Fiber To The Curb*);
- **FTTB** (*Fiber To The Building*) e **FTTH** são arquitecturas, em que a fibra chega até o edifício do cliente, sendo que no FTTH, a fibra chega mesmo até casa, ou ao espaço de trabalho do cliente. Após a chegada do sinal até à ONT/ONU, o mesmo é convertido e reencaminhado através de diversos meios, sejam eles par entrelaçado, coaxial, *wi-fi*, UTP (*Unshielded Twisted Pair*), PLC (*Power Line Communication*), ou mesmo fibra óptica, para poder ser utilizado pelo cliente, como mais lhe convier.

Para qualquer uma destas arquitecturas, a rede poderá ser dividida em vários segmentos. O primeiro liga o *central office* ao armário de rua, onde se encontra o primeiro degrau de *splitting* óptico, constituindo a *feeder network*, ou rede primária. O segundo liga o mesmo armário de rua ao ponto de distribuição, geralmente constituído por outro degrau de *splitting* óptico, designando-se *distribution network* (rede de distribuição). O segmento final é responsável pela ligação do ponto final de distribuição ao ONT/ONU do cliente, sendo nomeado por *drop network*, ou rede do cliente, como é referido na **Secção 2.3**. No caso particular da residência do cliente se encontrar no interior de um edifício, é comum o último ponto de flexibilidade ser à entrada do edifício.

3.2 Tecnologias e Soluções de Rede

3.2.1 Passive Optical Networks

PON (*Passive Optical Networks*) constitui um tipo rede ponto-a-multiponto, que utiliza uma arquitectura FFTP (*Fiber To The Permisses*), onde são usados *splitters* ópticos passivos, para que uma única fibra possa servir vários clientes, tipicamente entre trinta e dois e cento e vinte oito. Esta arquitectura de rede permite uma grande redução, tanto da quantidade de fibra, como do equipamento no *central office* necessários, em comparação com arquitecturas ponto-a-ponto.

O sinal de *downstream* provém do *central office* (CO), em forma de *broadcast*, para todos os assinantes abrangidos e é usada uma encriptação, para garantir que apenas o sinal correcto seja decodificado no destino. Quanto ao tráfego no sentido ascendente, os sinais provenientes dos diversos utilizadores são combinados usando protocolos baseados em TDMA. Os equipamentos

OLT (*Optical Line Terminal*), que se encontram do lado do operador, comunicam com os equipamentos ONU (*Optical Network Unit*), perto dos utilizadores finais, de forma a garantir *time slots*, para as comunicações *upstream* necessárias.

Várias tecnologias foram estandardizadas, partindo do conceito PON. A primeira delas foi o APON (*Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network*), baseado no ATM, evoluindo mais tarde para BPON (*Broadband Passive Optical Networks*) que, partindo do mesmo princípio e mantendo retrocompatibilidade, adicionava entre outras coisas, a capacidade de realizar WDM (*Wavelength-division Multiplexing*) e maior dinamismo ao *upstream*. Do melhor destas tecnologias proveio o *standard* que no ano de 2003 se foi massificando um pouco por todo o mundo – a GPON (*Gigabit Passive Optical Network*), devido ao forte investimento no mesmo, por parte de grandes operadores tais como: as americanas Verizon e AT&T, a British Telecom, a Mobily da Arabia Saudita ou a Etisalat dos Emirados Árabes Unidos. A GPON foi definida pela recomendação G.984.1 do ITU-T, - permite transportar Ethernet e suporta tráfego ATM-TDM (*Time Division Multiplexing*), utilizando métodos de encapsulamento GEM (*GPON Encapsulation Method*)

Também no Japão, foi realizado um forte investimento no sentido de modernizar as redes telecomunicações, mas optando por uma tecnologia diferente, estandardizada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) – EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), ao contrário do APON, BPON e GPON que eram *standards* ITU. Este usava protocolos Ethernet e IP, em vez de ATM e SONET e tinha taxas de transmissão simétricos de *1Gbps*, ao invés da GPON que apresentava assimetrias nos sentidos descendentes e ascendentes - *2.5Gbps* e *1.25* respectivamente. Torna-se necessário referir que este *standard* IEEE não é compatível com os *standards* ITU.

Também a SCTE (*Society of Cable Telecommunications Engineers*) possui o seu *standard*, SCTE *Interface Practices Subcommittee standard*, em desenvolvimento, com vista à transmissão de sinais HFC RF (*Radio Frequency*) sobre PON.

Novas tecnologias estão a ser desenvolvidas, por forma a acompanhar o constante aumento de necessidades por parte dos utilizadores, sendo que algumas delas já foram estandardizadas. O 10GPON e o 10G-EPON oferecem *10Gbps/2.5Gbps* e *10Gbps/1Gbps*, respectivamente (**Figura 23**)

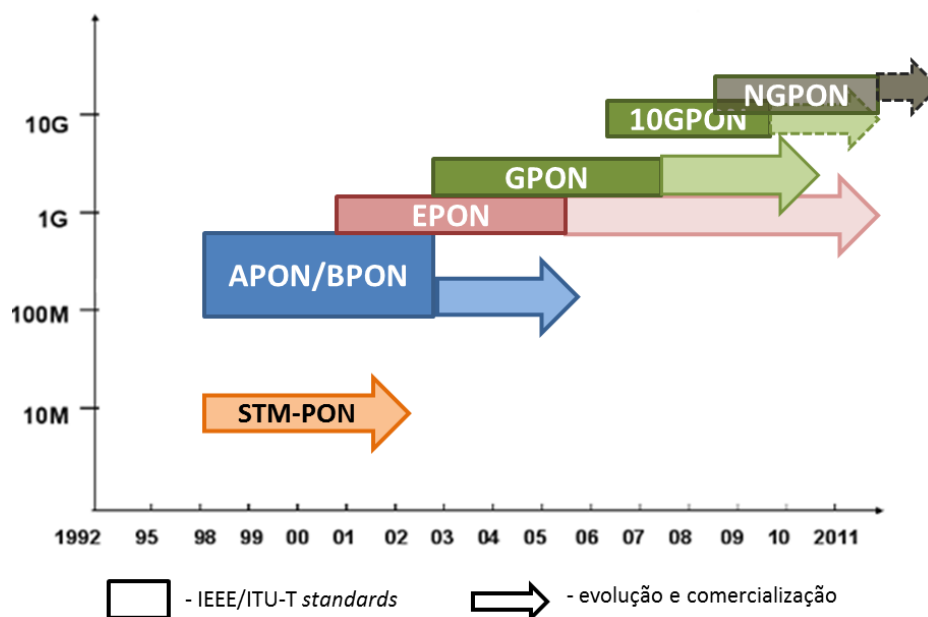


Figura 23 - Cronologia das Tecnologias PON. Adaptado de Errol. A origem da referência não foi encontrada..

Tanto o APON/BPON, como o EPON são efectivamente usados globalmente, mas a maioria dos projectos de implementação de redes de nova geração usa GPON. Todas estas tecnologias têm por base a combinação dos sinais em TDMA (*Time Division Multiple Access*), no sentido ascendente, e em TDM no sentido descendente (**Figura 24**). Para evitar colisões, o OLT atribui diferentes intervalos de tempo (*timeslots*), a cada ONU.

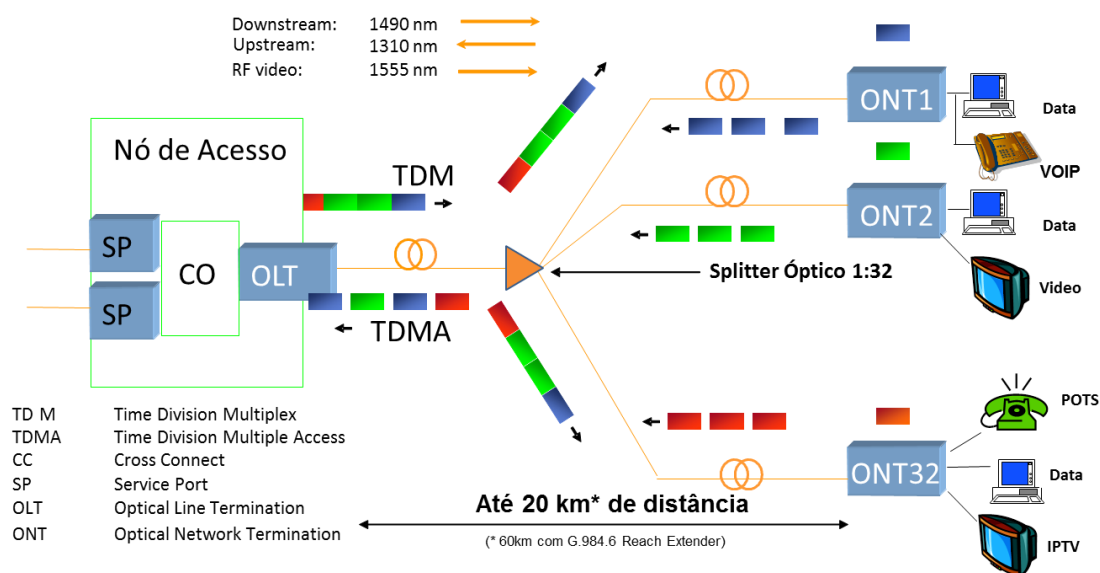


Figura 24 - Representação das tecnologias TDM-PON. Adaptado de [52].

O WDM-PON, (**Figura 25**) é um tipo de PON não normalizado, em desenvolvimento por diversas empresas, em que são usados múltiplos comprimentos de onda, com o objectivo de separar as ONU em diversos PON virtuais, coexistindo na mesma infra-estrutura física. De uma

maneira simples, obteríamos um comprimento de onda dedicado para cada ONU, com o objectivo de fornecer melhor privacidade e estabilidade, devido ao uso de comprimentos de onda distintos. Alternativamente, os comprimentos de onda podem ser usados para, colectivamente, e através de multiplexagem estatística, fornecer eficaz utilização dos mesmos, para reduzir o atraso verificado nas ONU. Mesmo com todas estas vantagens, verifica-se a desvantagem do custo do equipamento ser bastante superior, em comparação com o TDM-PON.

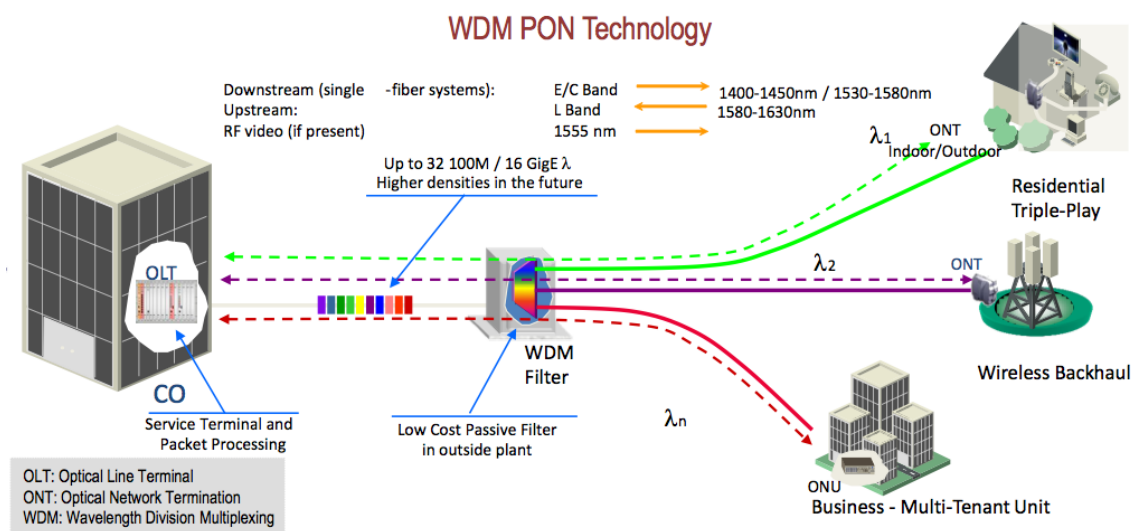


Figura 25 - Representação das tecnologias WDM-PON [41].

Uma nova tecnologia está a ser desenvolvida, no sentido de poder haver uma solução híbrida que utilize TDM e WDM – NGPON (*Next Generation Passive Optical Network*). Estudos nesta área estão a ser realizados por parte de diversas empresas, não sendo ainda certo a utilização da infra-estrutura da rede existente (**Figura 26**). O IEEE suporta os desenvolvimentos que têm ocorrido neste segmento, com os requisitos de que se mantenha a coexistência entre PON tradicionais e NGPON, na mesma rede, e com o uso da mesma infra-estrutura sem qualquer necessidade de intervenção.

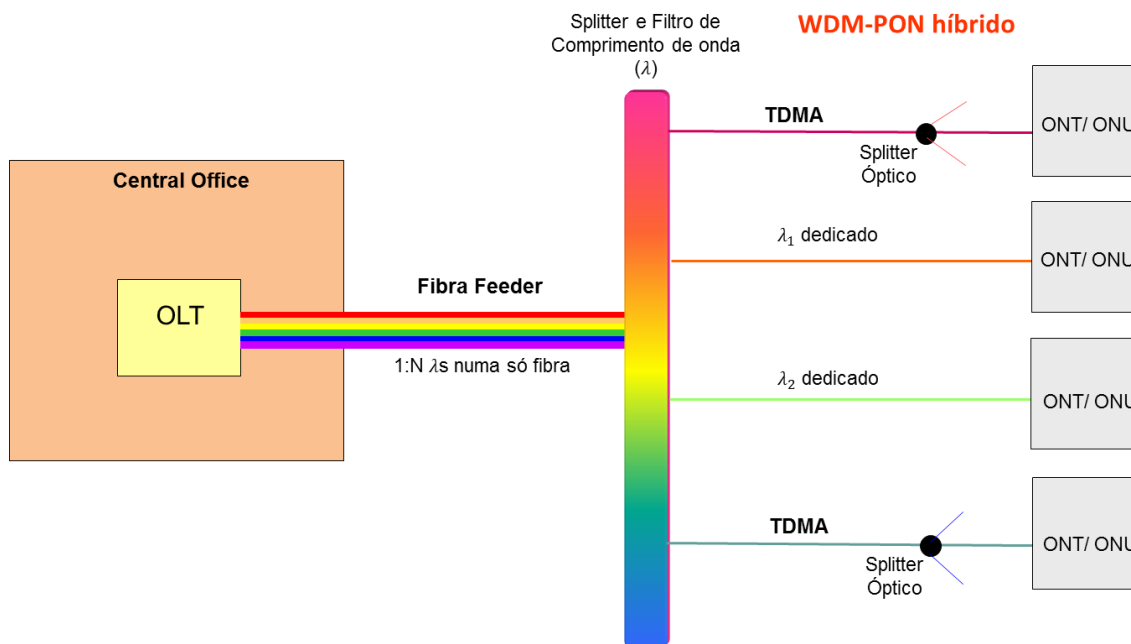


Figura 26 - Representação das tecnologias WDM e TDM em funcionamento simultâneo. Adaptado de [52].

Com o objectivo de dotar as *Passive Optical Networks* de alguma capacidade de *future proof* (capaz de servir necessidades futuras), encontram-se em desenvolvimento tecnologias que permitirão utilizar a amplificação óptica, para obter redes de grande alcance (aproximadamente 100km), de modo a ser possível ligar a rede de interligação à rede de acesso, sem ser necessário equipamento adicional, eliminando as redes *metro* (segmento terminal da rede *core* dentro de uma zona metropolitana). Estas redes designam-se por LR-PON (*Long-Reach Passive Optical Network*). Apesar do natural aumento do custo do equipamento, em comparação com, por exemplo, o EPON ou GPON, as LR-PON, oferecem claras vantagens aos operadores que pouparão nos custos do equipamento da rede *metro* e poderão cobrir as zonas rurais a custos mais baixos, assim como diminuir o número de OLT necessários.

3.2.1.1 GPON

A GPON é uma tecnologia de acesso de grande largura de banda partilhada, utilizada em todo o mundo para FTTH, sendo considerada como a sucessora do BPON. Tem a vantagem de ser a solução de mercado com custos mais reduzidos, pois cada saída de uma OLT poderá servir até 128 clientes. Essa partilha de equipamento resultará numa das maiores desvantagens desta solução, associada ao facto da largura de banda disponível ser inversamente proporcional ao número de utilizadores da rede.

Numa rede de acesso GPON, o equipamento da rede poderá ser agrupado em três grupos principais (excluindo a fibra óptica), tal como mostra a **Figura 24**: OLT, *splitters* e ONU.

A *Optical Line Termination* é o concentrador de rede activo, instalado no CO e poderá ser dividido em três tipos de componentes com diferentes tipos de funcionalidades:

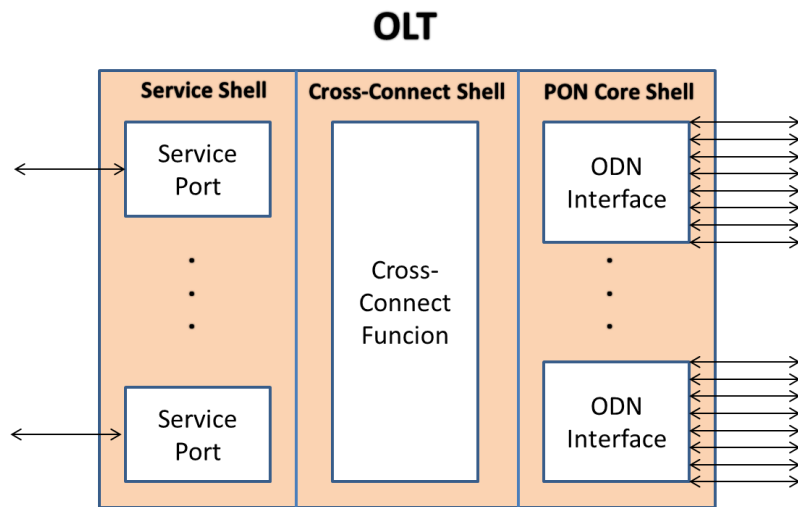


Figura 27 - Esquema de um OLT. Adaptado de [15].

- **Service Shell:** fornece a comunicação para a rede Metro, convertendo os serviços da referida rede para a rede PON [32];
- **Cross Connect Shell:** provê a comunicação entre a *Core Shell* e a *Service Shell* [32];
- **PON Core Shell:** é responsável por vários mecanismos de controlo, tais como OAM (*Operations. Administration and Management*), DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*) ou PDU (*Protocol Data Unit*) e por facultar os meios necessários, para a transmissão óptica entre o OLT e os utilizadores, e vice-versa [32][33]. As interfaces ODN são usadas para fornecer a ligação física com a rede de acesso.

Os splitters ópticos passivos permitem, no sentido descendente, que uma fibra única monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*) divida a sua potência por N utilizadores, para que seja assim partilhada, reduzindo os custos da rede. A potência, que cada *splitter* apresenta à saída, é cerca de $1/N$ da potência que recebe à entrada. No sentido ascendente, os sinais enviados pelas ONU são multiplexados num único sinal, que vai ser enviado para a OLT.

O ONT/ONU consiste no equipamento terminal que se encontra nas imediações ou no interior da casa do cliente (neste caso apenas poderá ser utilizado pelo referido cliente), convertendo os sinais ópticos em sinais eléctricos que serão interpretados pelo equipamento terminal. Note-se que uma ONU ou ONT poderá localizar-se num armário de rua e servir um conjunto de edifícios. A diferença entre ONU e ONT ignora-se geralmente; ONU é, sob o desígnio do *standard* ITU-U, um nome genérico para o equipamento localizado perto do cliente convertendo

o sinal da fibra óptica para Ethernet, POTS (*Plain Old Telephone Service*) ou outras interfaces, servirá um ou mais clientes, estejam eles localizados em edifícios residenciais ou empresariais; o ONT é considerado um equipamento genérico que pretende servir geralmente uma casa singular, ou seja um só cliente, tornando-se de um preço bastante mais acessível que uma ONU.

A norma GPON suporta diferentes taxas de transmissão, no sentido ascendente e descendente, tal como mostra a Tabela 1:

Tabela 1 – Taxas de Transmissão para tecnologia GPON [20].

Direcção do Fluxo	Taxa de Transmissão
Downstream	1244.16 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s
Upstream	155.52 Mbit/s
	622.08 Mbit/s
	1244.26 Mbit/s
	2488.32 Mbit/s

É possível realizar todas as combinações de taxas de transmissão (exceptuando *downstream* a 1.2Gbit/s e *upstream* 2.4Gbit/s), sendo mais comum encontrar a combinação de 1.2Gbit/s para o sentido ascendente, e 2.4Gbit/s no sentido descendente.

A GPON tem uma gama de comprimentos de onda que varia na gama 1480 – 1500 nm para *downstream* e 1260 – 1360 para *upstream*. Poder-se-ão encontrar situações, em que exista um comprimento de onda adicional, na ordem dos 1550nm a 1560 nm, utilizada no sentido *downstream* para transportar vídeo RF, o que é visto hoje em dia, pelos operadores, como uma necessidade do cliente tradicional dum serviço *Triple-Play*.

O padrão G.984 permite um alcance máximo de 60 km e alcance preferencial de 10 ou 20km, de modo a que o díodo FPL (*Fabry Perot Laser*) possa ser usado no ONU para transmitir as velocidades referidas, e devido à própria atenuação. O alcance máximo de 60 km poderá ser atingido com a nova especificação do padrão, o G984.6, que fornece um *Mid-Span Extender* (amplificador óptico activo).

A GPON apresenta ainda serviços de correcção de erros do tipo FEC (*Forward Error Correction*), DBA e ainda segurança com algoritmo de encriptação AES (*Advanced Encryption Standard*).

3.2.1.2 EPON

A tecnologia EPON baseia-se no padrão Ethernet, transportando o tráfego de dados em *frames* Ethernet, ao contrário das outras tecnologias PON, que têm como base o padrão ATM.

Suporta taxas de transmissão até 1Gbit/s , com um alcance de 20 km . Em termos de fiabilidade económica e tecnológica, o EPON permite fornecer uma simples e fácil gestão da conectividade, baseada em ligações Ethernet, nos equipamentos IP em ambos os extremos da PON. Tal como acontece na rede GPON, é aconselhada para transportar tráfego por pacotes e tráfego de vídeo e voz.

Nesta tecnologia EPON, implementa-se habitualmente usando uma topologia ponto-a-multiponto, em árvore com o uso de splitters ópticos de 1:8 até ao máximo de 1:64. Uma rede EPON, tal como se pode visualizar na **Figura 24**, inclui um OLT e o ONU. O OLT fica situado no CO, onde habitualmente existe um *switch* Ethernet, ou uma outra plataforma de conversão multimédia. A ONU-EPON encontra-se no edifício ou na própria residência, e usualmente tem uma interface WAN (*Wide Area Network*) 802.3ah, onde é recebido o sinal, e uma interface 802.3x Ethernet para o utilizador.

A especificação 802.3ah do IEEE, define os protocolos MPCP (*Multi-Point Control Protocol*) e P2PE (*Point-to-Point Emulation*), dois comprimentos de onda $1490/1310\text{ nm}$ na camada física, para uma distância de 10 e 20 km , como sendo os requisitos necessários para construir um sistema EPON. O protocolo MPCP é responsável pela atribuição da largura de banda e controlo da rede, no que toca a incluir novos ONU (processo de *auto-discovery*) e medir o tempo de resposta para cada ONU. Os sistemas típicos, baseados em EPON, poderão acrescentar serviços extra, tal como indica o padrão 802.3ah do IEEE, tais como segurança, alocação dinâmica de largura de banda e autenticação.

3.2.2 Active Optical Networks

As redes ópticas activas diferenciam-se das redes passivas pela dependência em equipamento eléctrico na rede de distribuição, ou ODN (*Optical Distribution Network*), responsável pela distribuição do sinal. Esse equipamento, que poderá ser um *router* ou um *switch* activo, será responsável pela transformação do sinal óptico em eléctrico e novamente em óptico. O sinal, que sairá do *central office*, é direccionado apenas para o cliente ao qual se destina, evitando assim a colisão de sinais nos pontos de junção. Isto deve-se ao facto destes equipamentos apresentarem capacidade de *buffering*.

O tipo mais comum de redes ópticas activas baseia-se no standard Ethernet. As *Active Ethernet* usam *switches* ópticos, para distribuírem o sinal proveniente da estação central do operador. O standard IEEE 802.3ah permite velocidades de transmissão desde 100Mbps (em fibras monomodo) até 1Gbps .

Esta tecnologia óptica não se tornou numa opção viável para os operadores de telecomunicações, devido aos custos inerentes à criação e operação destas redes. O facto de os

equipamentos necessários à implementação destas redes apresentarem preços superiores em relação as redes passivas, bem como o constante elevado consumo energético, levou à não adopção de redes activas no segmento de acesso.

4. Modelos Geométricos para Parametrização da Distância OLT-ONU

4.1 Introdução e pressupostos

A escolha por parte de um operador da tecnologia, a utilizar numa rede de acesso, depende de diversos factores, nomeadamente os seguintes:

- O número de utilizadores que se pretende servir, uma vez que, quanto maior for o número de utilizadores a partilhar uma rede em simultâneo, menor será a largura de banda média disponível para cada um;
- A distância é um factor muito importante, pois no caso de as comunicações serem feitas ao longo de grandes distâncias, estas podem ser afectadas por fenómenos de distorção, interferência, ruído e atenuação.
- A distribuição geográfica das populações, a sua organização e os tipos de serviços que procuram, seguem padrões de alta complexidade e deverão ser considerados fundamentais.

Estes critérios, relacionados com a organização da população pelo território, serão alvo de uma análise aprofundada nesta dissertação. A título de exemplo, a densidade populacional não revela apenas o contraste entre aglomerados rurais e urbanos, mas também mostra fortes variações interurbanas e intra-urbanas [21]. Cada região terá que ser objecto de um estudo criterioso, com o propósito de obter mais informações sobre o mercado alvo, a sua demografia, o perfil socioeconómico, os serviços de interesse para o mercado alvo e soluções tecnológicas que permitam servir o mercado de maneira apropriada. Adicionalmente, é importante que os operadores consigam retirar o devido retorno do investimento.

Para o objectivo deste trabalho, foi considerada a arquitectura FTTH. Neste caso a fibra óptica chega directamente ao utilizador final, permitindo a colocação de uma fibra até cada unidade de alojamento.

Os elementos constituintes desta arquitectura são os seguintes:

- Estação local / Central Office, onde está localizado o equipamento necessário, para dialogar com a rede (OLT);
- Nó(s) de distribuição-agregação com *splitter* óptico;
- Ponto de interligação ao cliente (ONU).

No esquema seguinte, é possível observar os diversos pontos de flexibilidade na rede de acesso: o Central Office, os pontos de *splitting* nas redes *feeder*, *distribution* e *drop* (**Secção 3.1**). Num dos extremos encontra-se a rede *core* (**Secção 2.1**) e a rede de agregação, e no outro CPE (*Customer Premises Equipment*), normalmente uma ONU.

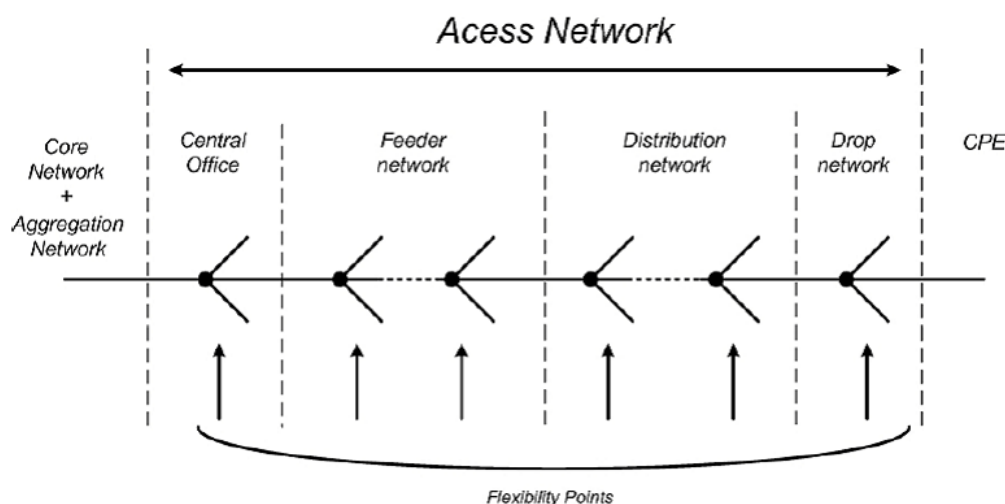


Figura 28 – Pontos de flexibilidade nas várias zonas da rede de acesso [20].

A figura seguinte é a representação esquemática da referida rede FTTH, com apenas um degrau de *splitting*. Posteriormente, será feita uma análise de sensibilidade para mais que um degrau (ver **secção 4.5**). O parâmetro L_1 representa a distância do *splitter* óptico até a ONU, e o parâmetro L_2 a distância do OLT ao referido *splitter*. A soma destes valores será referida por L e representa a distância desde o *central office* até casa do cliente.

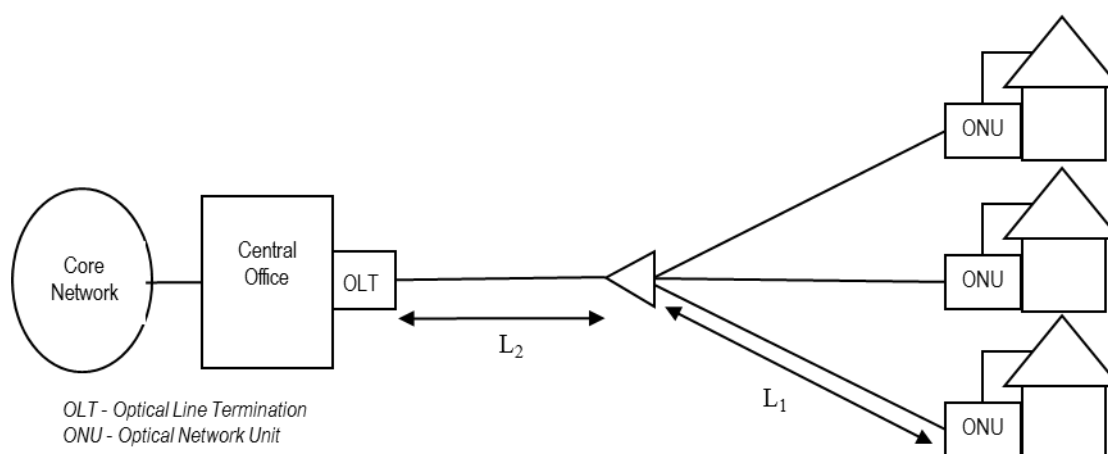


Figura 29 – Configuração FTTH, com apenas um nó de distribuição / agregação [17].

4.2 Modelos de Distribuição Geográfica [21]

Em termos ideais, será útil conhecer o modo como a população se distribui, para uma determinada área a servir. É, no entanto, impossível generalizar uma correspondência de tipo de área geográfica com um modo de distribuição populacional. Nesta secção serão estimadas funções matemáticas e apresentados os seus gráficos respectivos para os vários tipos de distribuição, de forma a permitir a realização de um estudo económico simples, mas que possibilite retirar conclusões sobre a importância deste parâmetro numa análise técnico-económica para um cenário de estudo e generalizar o custo da rede para uma localização tipo (em função da distribuição da população).

4.2.1 Distribuição Uniforme

A análise técnico-económica simplificar-se-ia bastante, se a população se distribuisse uniformemente pelo território, e o CO se localizasse no centro do mesmo. Os custos da fibra ficariam reduzidos e os seus cálculos seriam bastante facilitados. No entanto, este cenário será descartado, pois tais condições nunca se conseguirão encontrar nos dias de hoje.

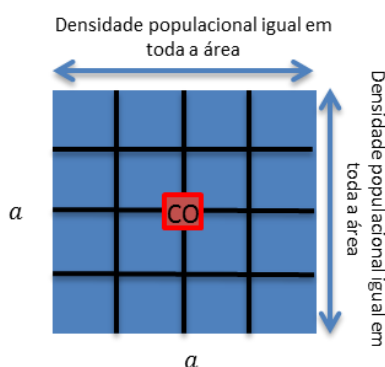


Figura 30 – CO centralizado numa área quadrada a servir, com dispersão uniforme da população [21].

Uma outra hipótese, para desenvolver o modelo matemático de cálculo, seria colocar-se um CO num dos extremos, para que servisse uma área igualmente quadrada, em que o cliente estaria a uma distância relativa entre 0 e 1 ($a = \sqrt{2}/2$), com uma densidade populacional uniforme, pelo que se pode considerar que toda a população estaria concentrada a uma distância do CO igual à distância média. Para este cenário hipotético, seria fácil calcular a dita distância média. Na **Figura 31** e na **Figura 32** observa-se um grafismo com a área a servir e sua distribuição.

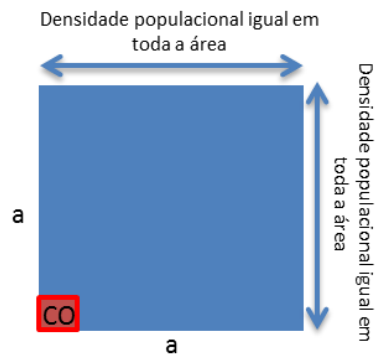


Figura 31 – CO localizado num dos extremos de uma área quadrada a servir, com dispersão uniforme da população [21].

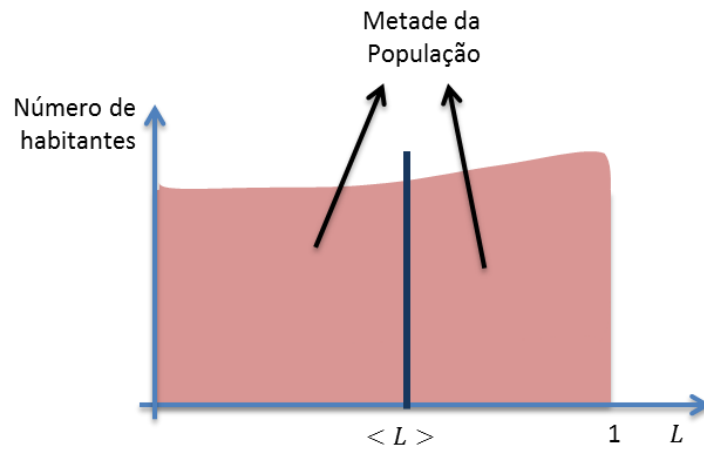


Figura 32 – Gráfico representativo do número de habitantes com o aumento da distância, para um CO localizado no extremo da área a servir.

Dada a área quadrada de lado a , a distância máxima, que um possível cliente estaria do CO, será dada por:

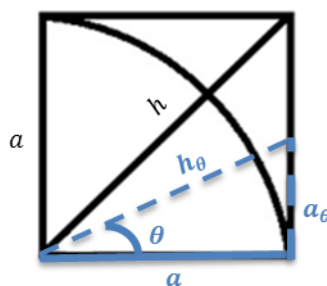


Figura 33 – Relações trigonométricas [21].

$$h^2 = a^2 + a^2 \Leftrightarrow h = \sqrt{2a^2} \Leftrightarrow \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow h = a\sqrt{2}; \quad (2)$$

Sendo assim, em termos de custos, terá que se considerar uma distância média do CO para a população média. Para isso considera-se o ângulo θ e obtém-se:

$$a_{\theta} = h_{\theta} \sin \theta. \quad (3)$$

em que, pela análise da **Figura 33**, se observa que $\theta \in [0; \pi/4]$.

Pela análise da figura e por (3) é possível verificar [21]:

$$h_{\theta} = \sqrt{a^2 + a_{\theta}^2} = \sqrt{a^2 + h_{\theta}^2 \sin^2 \theta} \Leftrightarrow \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow h_{\theta}^2 = a^2 + h_{\theta}^2 \sin^2 \theta \Leftrightarrow h_{\theta}^2 (1 - \sin^2 \theta) = a^2 \Leftrightarrow \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow h_{\theta} = \frac{a}{\cos \theta} \quad (6)$$

Através de (6), a distância média na direcção θ é dada por:

$$\langle L \rangle = \frac{h_{\theta}}{2} = \frac{a}{2 \cos \theta}. \quad (7)$$

Considerando o resultado de (7), é possível obter o valor médio da distância ao CO na direcção θ [21]. Seguidamente torna-se necessário calcular a média de todos os ângulos θ , sendo para isso obrigatório recorrer ao integral (8) e ao seu desenvolvimento em (9) e (10).

$$\frac{1}{\pi/4} \int_0^{\pi/4} \frac{a}{2 \cos \theta} d\theta = \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{\pi/4} \int_0^{\pi/4} \frac{1}{\cos \theta} d\theta = \frac{2a}{\pi} \ln \left[\left(\frac{1 + \sin \theta}{\cos \theta} \right) \right]_{\theta=0}^{\pi/4} = \quad (8)$$

$$= \frac{2a}{\pi} \ln \left[\frac{\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right)}{\frac{1}{\sqrt{2}}} \right] - \ln \left[\left(\frac{(1+0)}{1} \right) \right] = \frac{2a}{\pi} \ln \left[\frac{\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)}{\frac{\sqrt{2}}{2}} \right] = \frac{2a}{\pi} \ln \left[\frac{2}{\sqrt{2} + 1} + 1 \right] = \quad (9)$$

$$= \frac{2a}{\pi} \ln[\sqrt{2} + 1] = \frac{2 \ln[\sqrt{2} + 1]}{\pi} \cdot a \approx \quad (10)$$

$$\approx 0,561 \cdot a \quad (11)$$

Sabendo que $\langle L \rangle = 0,561 \cdot a$, é possível determinar a distância média a que um cliente se encontra da central do operador, localizada no extremo de uma área quadrada de lado a . Será útil para representar um cenário, em que a população se distribua uniformemente pelo território, possibilitando o cálculo dos custos médios para essa rede, para um determinado número de utilizadores.

4.2.2 Distribuição Não Uniforme da População

Como é fácil de perceber, o caso apresentado anteriormente é pouco realista para os dias de hoje, pois não é crível que a população esteja dispersa uniformemente numa área. Como tal, foram usadas duas funções matemáticas para definir mais três tipos de distribuição não uniforme, que se aproximam um pouco mais da realidade: processo de Poisson (com a população mais próxima ou afastada do CO) e Gaussiana (ou Normal).

4.2.2.1 Processo de Poisson

A distribuição de Poisson representa um modelo probabilístico, adequado para o estudo de um grande número de fenómenos observáveis, tais como: chamadas telefónicas por unidade de tempo, defeitos por unidade de área, acidentes por unidade de tempo, chegada de clientes a um supermercado por unidade de tempo, número de glóbulos sanguíneos visíveis ao microscópio por unidade de área, número de partículas emitidas por uma fonte de material radioactivo por unidade de tempo, *etc.* As probabilidades de um processo de Poisson (ver **Anexo A: Processos Matemáticos**), são dadas por:

$$P_{\lambda}(r) = \frac{(\rho t)^r}{r!} e^{-\rho t} \quad (12)$$

Isto representa uma distribuição de Poisson com média e variância $\lambda = \rho t$ [16].

Um modo de representar o aumento da população, em função da distância, faz-se através da seguinte formulação de Poisson:

$$P_{\lambda}(r) = \frac{(\lambda)^r}{r!} e^{-\lambda} \quad (13)$$

onde:

λ – Média de Poisson;

r – Número de Ocorrências de um evento.

A média de Poisson, λ , é um número real, igual ao número esperado de ocorrências num dado intervalo de tempo. Por exemplo, se o evento acontece a uma média de quatro minutos, e estamos interessados no número de eventos que ocorrem num intervalo de dez minutos, usar-se-ia como modelo a distribuição de Poisson com $\lambda = 10/4 = 2,5$. A **Figura 34** representa a função de Poisson, enquanto na **Figura 35**, está a função cumulativa de Poisson.

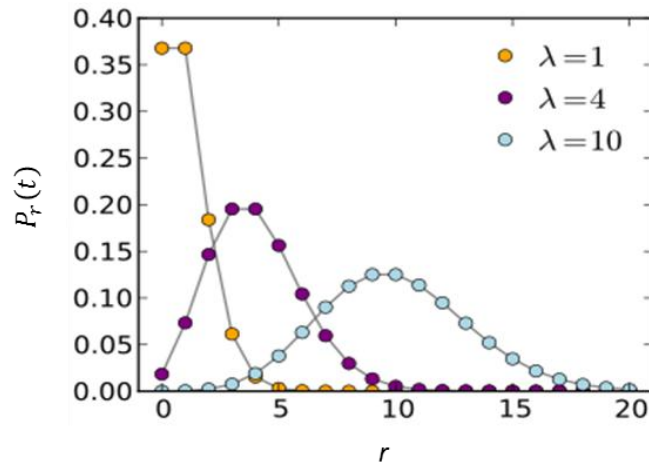


Figura 34 – Resultados da função de Poisson, com variação do parâmetro λ [43].

Em estatística, uma função de distribuição cumulativa descreve a probabilidade de uma variável x , para uma distribuição dada ser encontrada num valor inferior ou igual a X . Ou seja:

$$P_{\lambda}(r \leq R) = \int_0^R P_{\lambda}(r) \quad (14)$$

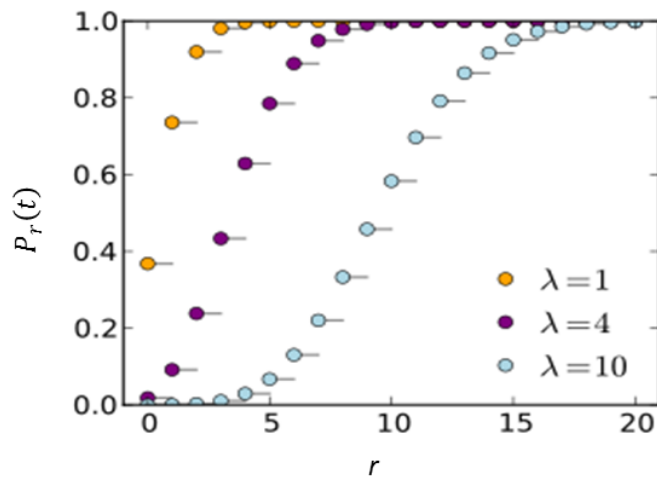


Figura 35 – Resultados da função de Poisson cumulativa, com variação do parâmetro λ [43].

4.2.2.1.1 População afastada do CO

Nesta situação concreta, pretende-se que a densidade populacional aumente com a distância ao CO. Na figura seguinte, o escurecer do azul representa o aumento da densidade populacional na área quadrada de lado a .

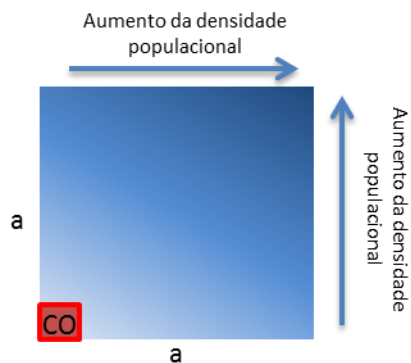


Figura 36 – CO numa extremidade de uma área a cobrir, com aumento populacional proporcional à distância.

Dando uso à função de Poisson e ao cálculo do integral da mesma, é possível definir a que distância do CO se encontrará a média da população $\langle L \rangle$, ou seja, obter-se-á uma estimativa dos custos da fibra, através da distância, na qual estará contida metade da população a servir.

$$\int_0^{\langle L \rangle} P_\lambda(r \leq R) = \frac{\text{Número de Habitantes}}{2} \quad (15)$$

No gráfico seguinte, é representada a função de Poisson, para uma distância relativa entre 0 e 1, média de Poisson de 13 e o número de UA (unidades de alojamento, que serão potenciais assinantes) de 50000. A média de Poisson foi obtida, através da experimentação dos efeitos que este parâmetro tem na construção da **Figura 37**, de modo a representar, o mais aproximadamente possível, a distribuição populacional pretendida.

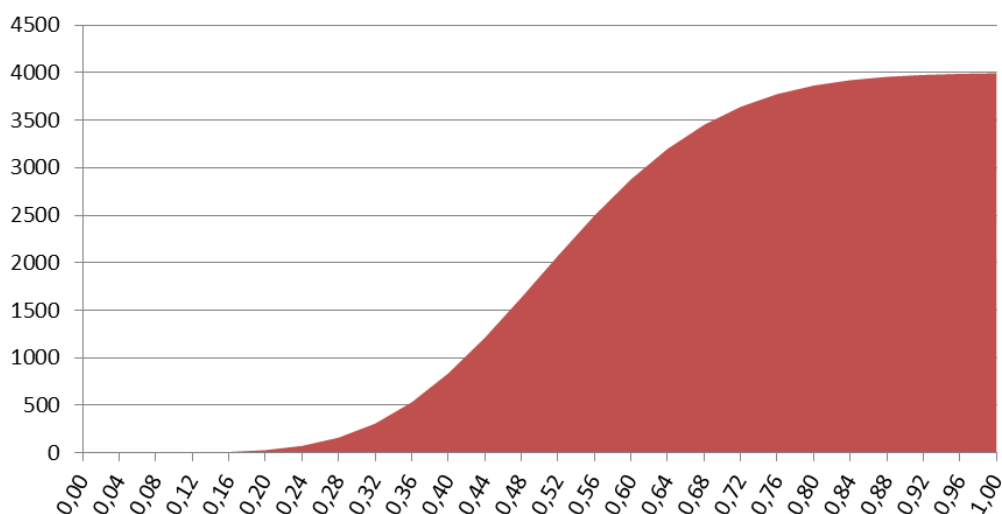


Figura 37 – Função de Poisson para $L_{\max}=1\text{km}$ e população 50000.

Calculando o integral da função, usando a ferramenta *Microsoft Excel*, é simples encontrar a distância, para a qual a população servida seria 25.000 habitantes. Esse valor é $\langle L \rangle = 0,746$ e está representado no gráfico seguinte.

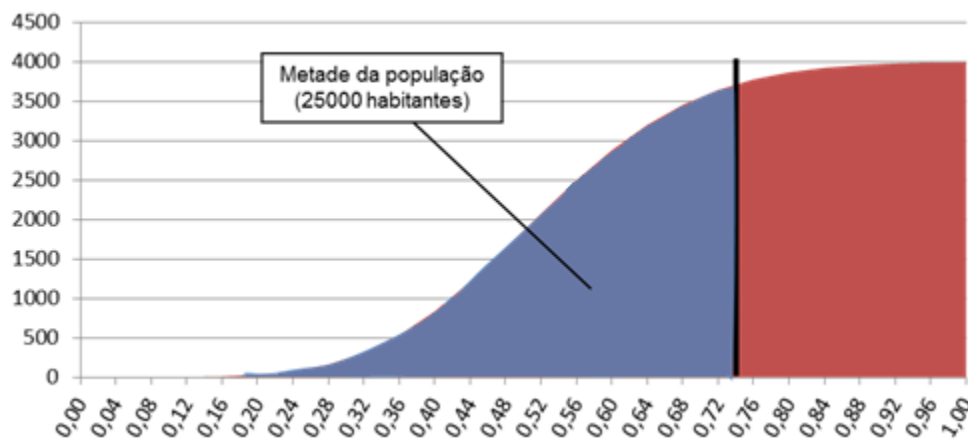


Figura 38 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000, com representação da distância média.

Concluindo, seria considerado o valor $\langle L \rangle = 0,746$ para o cálculo de custos da rede FTTH, em que foi ponderado que a população estaria afastada do CO a uma distância máxima de 1.

4.2.2.1.2 População próxima do CO

Nesta segunda situação, a densidade populacional diminui com a distância do *central office*. Na figura seguinte, o escurecer do azul representa o aumento da densidade populacional, nesta área quadrada de lado a .

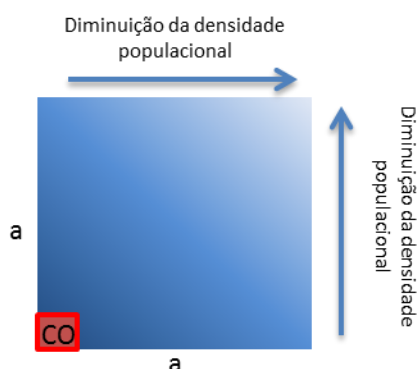


Figura 39 – CO numa extremidade de uma área a cobrir, com diminuição populacional proporcional à distância.

Seguindo o mesmo princípio da distribuição anterior, é calculado o integral (25), em que $\langle L \rangle$ é a distância que pretendemos obter, sendo que a única diferença passa pela modificação da função cumulativa de Poisson, invertendo as probabilidades.

$$\int_0^{<L>} 1 - P_\lambda(r \leq R) = \frac{\text{Número de Habitantes}}{2} \quad (16)$$

No gráfico seguinte representa-se a função de Poisson, para uma distância entre 0 e 1, média de Poisson de 13 e o número de habitantes (potenciais assinantes) de 50000.

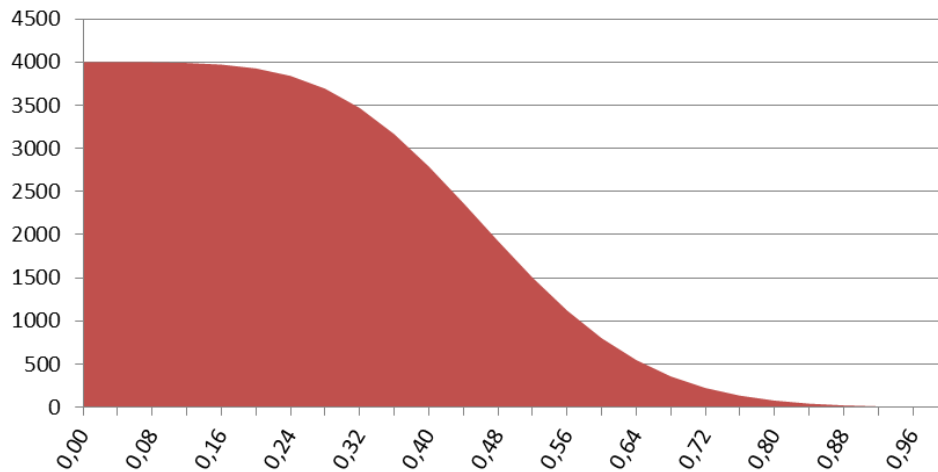


Figura 40 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000.

Calculando o integral do gráfico anterior, é obtido o valor da distância, para a qual a área da função é metade, ou seja, metade da população.

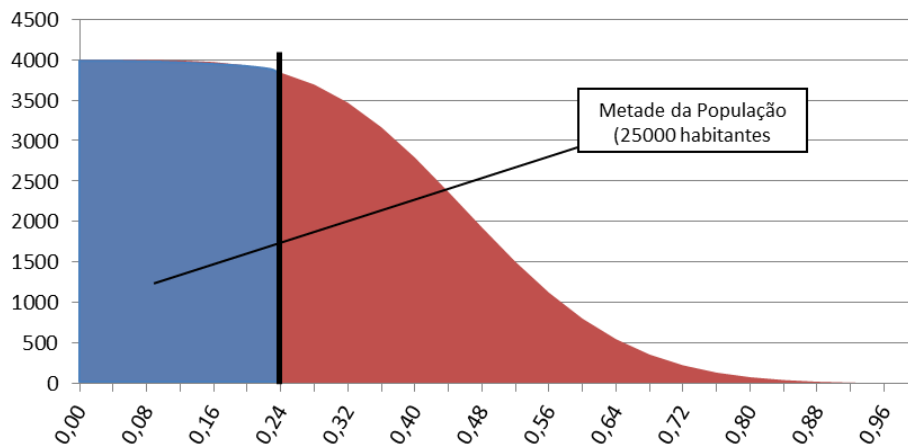


Figura 41 – Função de Poisson para $L_{\max}=1$ e população 50000, com representação da distância média.

O valor a ser considerado seria assim $<L> = 0,21$. Comparando com a distribuição anterior:

$$\frac{0,746}{0,21} = 3,55 \quad (17)$$

Este resultado é significativamente inferior (355%) ao obtido na situação, em que a população se encontrava na sua maioria afastada do CO.

4.2.2.2 População com Distribuição Gaussiana

A função normal ou Gaussiana usa-se para representar uma quarta possibilidade de distribuição da população. A seguinte formulação representa a referida função densidade de probabilidade, em que μ é a média e variância σ^2 (ver **Anexo A: Processos Matemáticos**).

$$f(x) = N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, x \in \mathbb{R}, \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0 \quad (18)$$

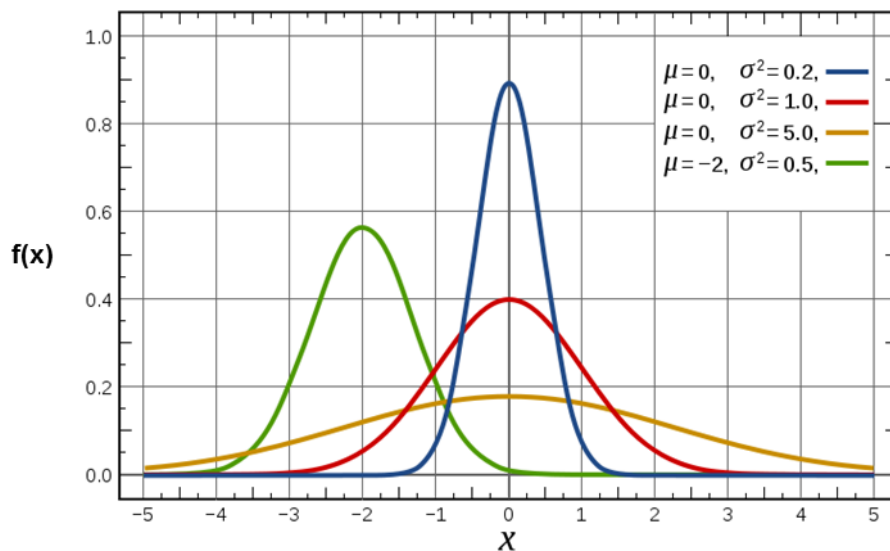


Figura 42 – Função densidade de probabilidade para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal *standard* [24].

Nesta situação, a população encontra-se maioritariamente numa zona central da área a servir, com $\mu = 0, \sigma = 1$, como tal a formulação toma a forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{x^2}{2}\right)}. \quad (19)$$

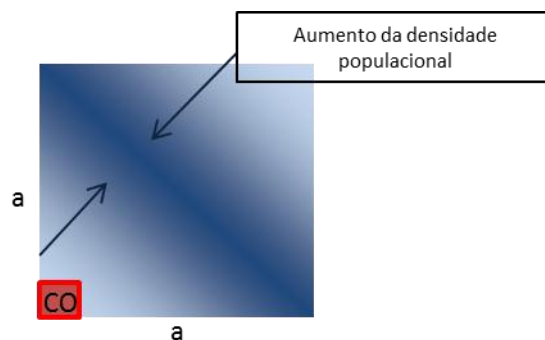


Figura 43 – Representação simplista do aumento de densidade populacional centralizada na área a servir.

Calculando novamente o integral da função, neste caso da função normal, para obter a distância pretendida, $\langle L \rangle$, através do integral que representa metade da população.

No gráfico seguinte é apresentada a função normal, para uma distância relativa entre 0 e 1, $\mu = 0, \sigma = 1$, e o número de habitantes (potenciais assinantes) de 50000.

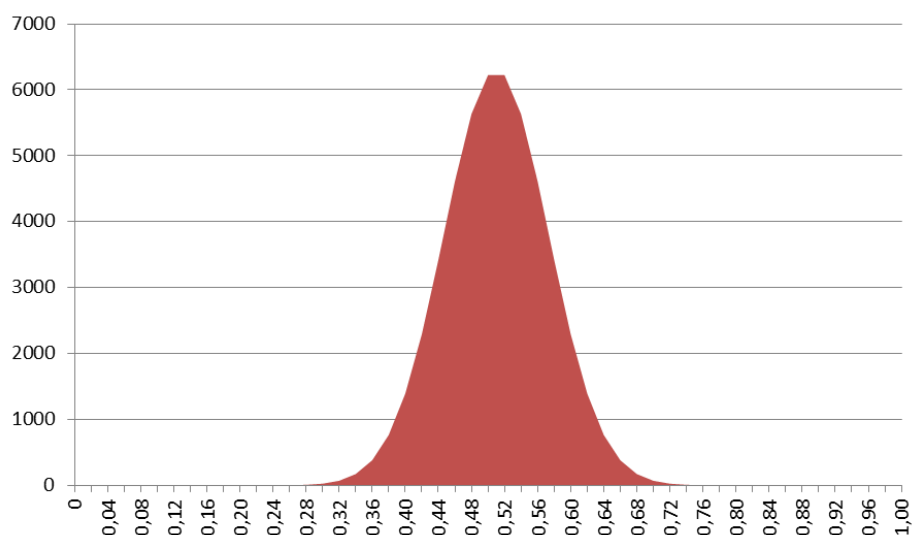


Figura 44 – Representação gráfica da função normal com $L_{\max}=1$.

O valor resultante para $\langle L \rangle$, seria assim 0,5, metade da distância máxima, tal como se pode observar na **Figura 45**.

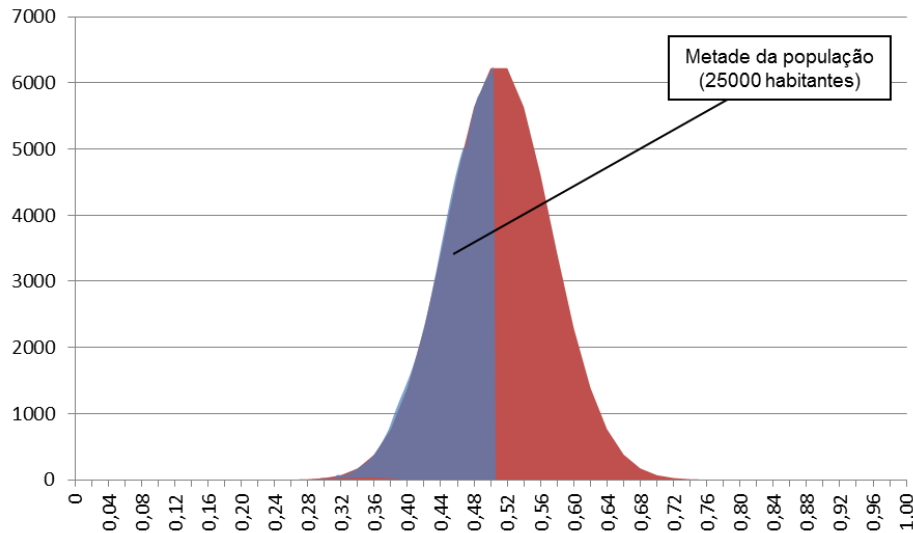


Figura 45 – Representação gráfica da função normal $L_{\max}=1$, com saliência para metade da área do gráfico (metade da população).

4.3 Conversão da Distância Linear em Distância Real

O investimento necessário, para implementação de uma rede FTTH, está fortemente dependente das infra-estruturas passivas existentes. No entanto, a existência ou não de infra-estruturas foi ignorada nesta secção, sendo todas as distâncias entre dois pontos distâncias mínimas. Conhecido este facto, é necessário referir que os cálculos efectuados nas secções anteriores não representam valores finais, para serem usados numa análise técnico-económica, pelo simples facto que não pretendemos efectuar a referida análise numa zona deserta, mas sim em zonas urbanas, suburbanas ou mesmo rurais, onde já existem ruas, prédios e infra-estruturas para a passagem da rede. Será feita optimização da distância L_{linear} (obtido anteriormente) para um L_{real} , usando um parâmetro de conversão definido por k .

Para exemplificar este procedimento, pode-se supor uma localidade, onde as ruas estão perfeitamente organizadas, paralelas e perpendiculares entre si, tal como se pode observar na **Figura 46**.

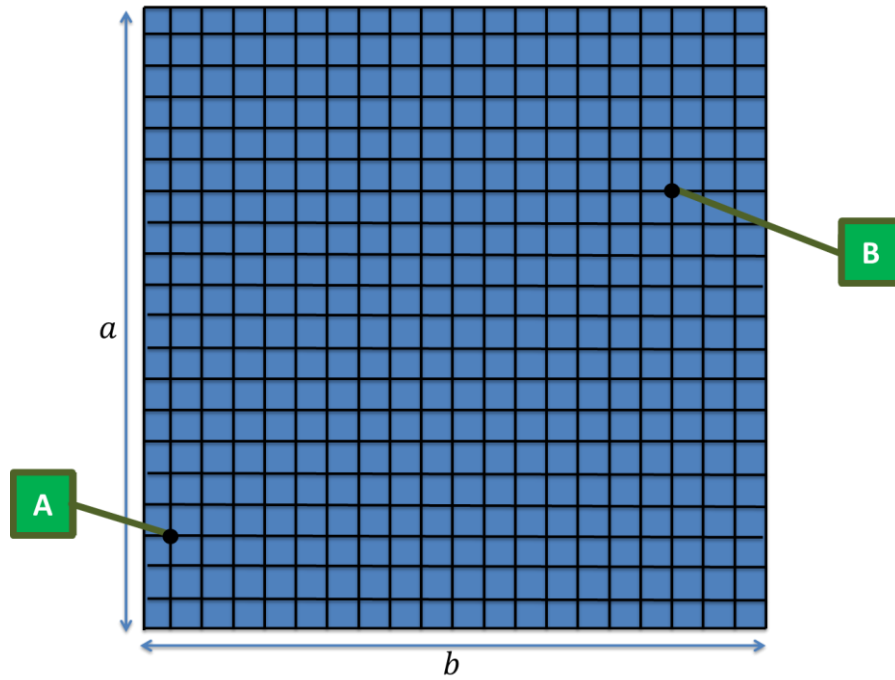


Figura 46 – Organização perfeita de ruas numa localidade (paralelamente / perpendicularmente).

Considerando uma área qualquer de eixos \vec{a} e \vec{b} , como por exemplo um quadrado de lado $1km$, onde neste caso $a = b = 1km$, e cuja organização urbana permite blocos de $50m$, ou seja, a distância entre duas ruas paralelas mais próximas é de $50m$. Perante estes pressupostos, podem-se observar vinte ruas com uma orientação e vinte com a orientação perpendicular. A partir deste exemplo, torna-se possível calcular o número estimado de vias e ruas, numa área com este tipo de organização, por km .

$$V = (20 + 20)(a \times b) \quad (20)$$

Onde:

V – Valor em km de vias e estradas, por km^2 de área.

Pode-se estimar um total de $40km$ de vias e estradas por km^2 neste tipo de organização. Na **Figura 46** observa-se facilmente que a distância linear entre os pontos A e B, é menor que a distância real entre os mesmos pontos, percorrendo apenas ruas representadas. Ou seja,

$$L_{linear,A \rightarrow B} = \sqrt{(11\vec{a})^2 + (16\vec{b})^2}; \quad (21)$$

$$L_{real,A \rightarrow B} = 11\vec{a} + 16\vec{b}. \quad (22)$$

Daí conclui-se que

$$L_{linear,A-B} < L_{real,A-B}. \quad (23)$$

Para valores de $a = b = 1km$, da relação usada para converter L_{linear} em L_{real} (usando a variável k):

$$L_{real} = k \times L_{linear}, \quad (24)$$

obtém-se que $k = 1,39$.

São, no entanto, poucos os exemplos que se podem encontrar de uma localidade assim organizada num país como Portugal. Revela-se necessário concretizar o cálculo de k para um caso mais próximo do comum para a realidade portuguesa.

Para efectuar o referido cálculo, foi usada a região urbana de Aveiro, cuja escolha assenta em motivos simples: ser uma zona conhecida, tanto do autor de possíveis leitores deste trabalho e ser uma zona relativamente plana, diminuindo o efeito do relevo nas questões de cálculo de distâncias. Para concretizar este objectivo foi usada a ferramenta *Google Maps*, o que permitiu dividir a região urbana e suburbana de Aveiro em *clusters*.

A metodologia *cluster* tem por base um modelo territorial, onde a área a analisar é dividida em quadrados regularmente distribuídos, permitindo a descrição de áreas geográficas grandes e heterogéneas (ver **Anexo C: Metodologia para a classificação de áreas geográficas**). Na figura seguinte, são representados 9 *clusters*, uniformemente distribuídos.

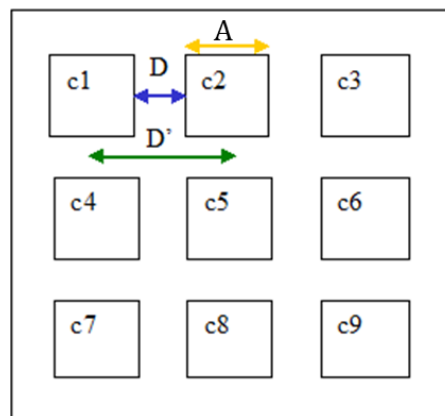


Figura 47 – Modelo Territorial dos quadrados distribuídos regularmente [35].

No caso concreto que pretendemos analisar, a distância entre quadrados (D) é nula, e o território foi dividido em 64 *clusters*. Observando a figura seguinte, é possível constatar que nove dos quadrados representam, na sua maioria, uma área que está fora do interesse deste trabalho -

Ria de Aveiro - representada por uma cruz. Assim, restam 55 *clusters*, representando alguns deles zonas específicas da cidade, tais como zonas de grande concentração de população ou zonas industriais. Em consequência, a morfologia das ruas localizadas nesses mesmos locais, será alvo de uma análise específica. As áreas, Zona Industrial de Esgueira, Vera Cruz, Forca e Glória, representam respectivamente: $\frac{9}{55}$, $\frac{3}{55}$, $\frac{1}{55}$ e $\frac{7}{55}$ do território analisado.

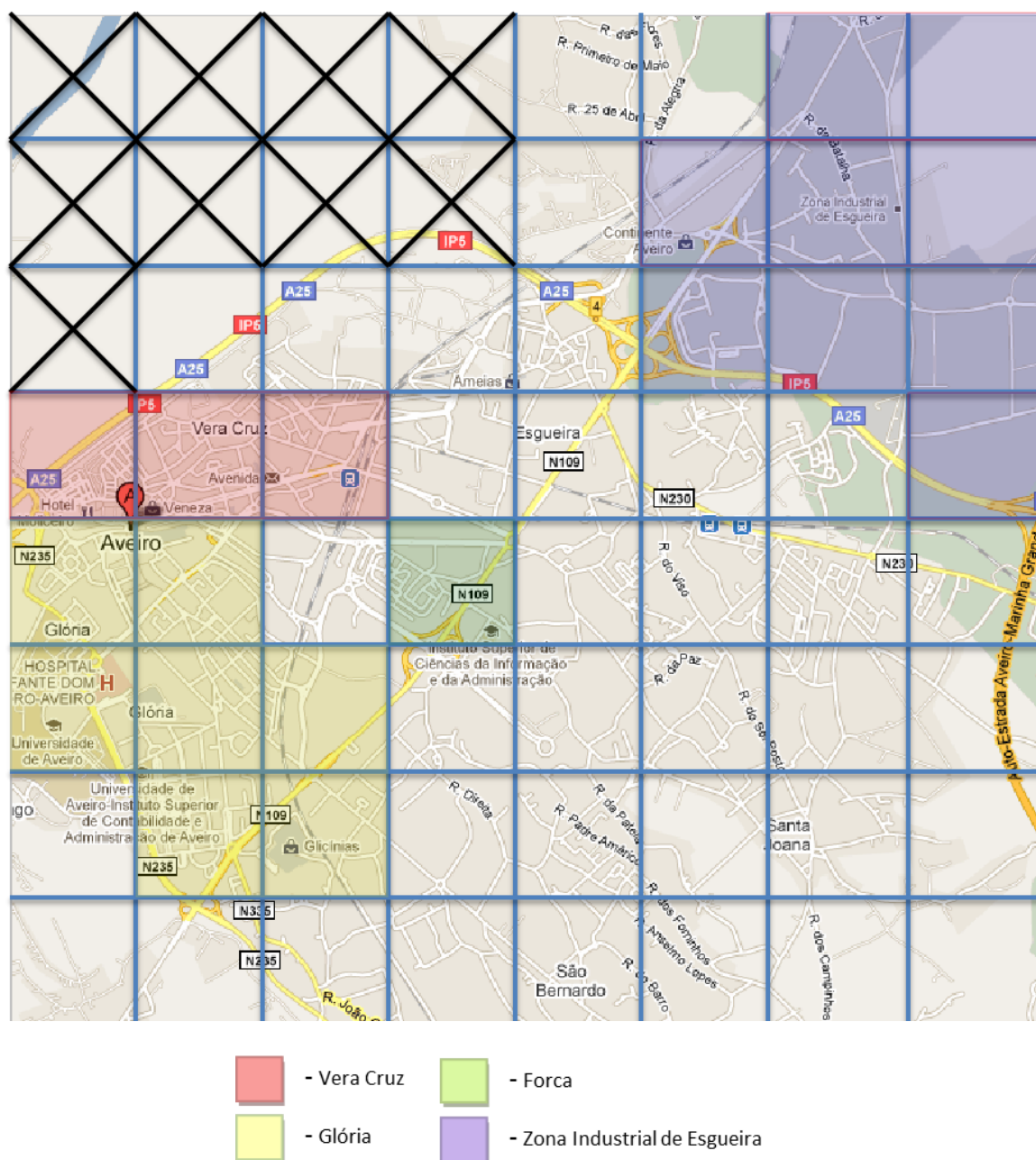


Figura 48 – Divisão territorial homogênea de Aveiro em quadrados.

Foram efectuadas uma série de medições, para encontrar o parâmetro de conversão (k) de L_{linear} para um L_{real} das diversas zonas. Com esse valor, é assim possível converter a distância directa entre dois pontos do território analisado, para a distância entre os referidos dois pontos,

mas apenas atravessando ruas e estradas, onde possivelmente já se encontravam infra-estruturas passivas ou a facilidade de instalação das mesmas. Foi também calculado o parâmetro de conversão para as zonas de Sta. Joana / S. Bernardo / Esgueira, valor esse que foi usado para os restantes *clusters*. Os resultados estão representados na tabela seguinte:

Tabela 2 – Parâmetro de conversão k para diversas áreas específicas da zona urbana de Aveiro

Zona Industrial de Esgueira	1,437048156
Vera Cruz	1,471411251
Forca	2,161304395
Glória	1,691617862
Outros	1,407364238

Conhecidos os valores das diversas áreas, foi calculada uma média ponderada para obter o factor de conversão final, apresentado na seguinte expressão matemática:

$$k = 1,437048156 \times \frac{9}{55} + 1,471411251 \times \frac{3}{55} + 2,161304395 \times \frac{1}{55} + 1,691617862 \times \frac{7}{55} + 1,407364238 \times \frac{35}{55} = 1,414423935 \approx 1,414. \quad (25)$$

Apesar do valor deste parâmetro ser já de uma exactidão aceitável, para a análise que se pretende fazer neste trabalho, o mesmo não poderá ser considerado, caso a área de estudo tenha outra geografia ou distribuição populacional. Por exemplo, se o território da **Figura 48** se localizasse numa região montanhosa e não numa região plana, o cálculo de k teria obrigatoriamente de envolver uma análise mais rigorosa, uma vez que deveriam ser considerados, entre outras coisas, os desníveis de relevo. Igualmente para o caso do território de estudo ser uma zona rural, onde poderia existir menor quantidade de vias a cablar e as infra-estruturas presentes serem igualmente escassas.

4.4 *Link Budget*

O *link budget* é o somatório de todos os ganhos e perdas, neste caso sob o meio de fibra óptica, desde o transmissor (localizado no OLT) até ao receptor da rede (ONU na casa do cliente), considerando-se toda a atenuação na propagação do sinal emitido, até ao sinal ser recebido e convertido para sinal eléctrico. A atenuação definir-se-á como toda a perda de potência do sinal limitando o comprimento máximo, a que o sinal pode ser propagado devido à limitada sensibilidade dos detectores [51].

A atenuação dependerá de todos os factores inerentes a propagação da fibra – efeitos de micro-deformações, curvatura da fibra, dispersão ou absorção – no entanto para o efeitos de

cálculo da distância máxima dada pelo link budget, apenas serão considerados os efeitos de ganhos nas antenas (para o caso de transmissão no meio livre), perdas por fusões, conectores, splitters ou qualquer outro tipo, e será também adicionada uma margem de segurança para precaver os efeitos de problemas antecipados.

O *link budget* torna-se importante na definição da distância máxima, a que o cliente estará do OLT, pois poderá estar limitado pelos referidos ganhos e perdas na fibra. A L_{max} dada pelo *link budget*, definida na seguinte expressão [2]:

$$L_{\max_LinkBudget} \leq \frac{LinkBudget - 10\log_{10}\left(n_s 10^{S_L/10}\right) - C_L(2 + 2n_s) - S_M}{A_L}. \quad (26)$$

Onde:

$Link\ Budget\ (dB)$;

n_s – Número de Splitters;

S_L – Perdas do Splitter (dB);

C_L – Perdas do Conector (dB);

S_M – Margem de Segurança (dB);

A_L – Perdas por Atenuação (dB).

O *link budget*, representado na equação (26), dependerá da classe do equipamento, sendo as classes $B +$ ($LinkBudget = 28dB$), C ($LinkBudget = 30dB$) e $C +$ ($LinkBudget = 32dB$) as mais comuns. Para efeitos de cálculo, supôs-se o uso da classe $B +$. O número de *splitters* dependerá da quantidade de degraus, para este caso tomará apenas valores de 1 ou 2. Para as perdas de cada *splitter* generalizou-se um valor de $0.2dB$, independente do rácio de *splitting*. Este aspecto seria um ponto interessante a melhorar na fórmula considerada, visto que o rácio de *splitting* é, de facto, um factor importante no cálculo do *link budget*, uma vez que a potência do sinal é dividida em cada degrau de *splitting*, resultando em grandes diferenças na distância máxima suportada pela configuração de rede. Cada conector tem perdas na ordem de $0.5dB$ e será considerado que a rede inclui dois conectores base (na OLT e na ONU) e mais dois por cada *splitter*. Por norma, a margem de segurança usada é de $3dB$, e a atenuação por *km* dependerá do tipo de fibra, podendo variar entre $0.19dB$ até $0.35dB$, sendo que, para este caso, foi usado $0.3dB$.

Caso L_{max} seja maior que $L_{\max_LinkBudget}$, a formulação da rede não será válida e deverá ser reduzida a área a cobrir, de modo a que não haja clientes a uma distância superior a $L_{\max_LinkBudget}$.

É importante salientar que a tecnologia GPON tem um alcance físico máximo de $20km$. Então, caso este valor seja ultrapassado, a configuração de rede não estará em conformidade

com os padrões G.984 que definem o *standard*. Ainda assim, mesmo sabendo que este cálculo de *link budget* se encontra bastante simplificado, será um ponto a ter em consideração nos cenários de estudo.

4.5 Níveis de *Splitting*

O número de degraus de *splitting* e a sua distância ao *central office*, apresenta-se como um importante parâmetro na definição da rede FTTH e explica a quantidade de *splitters* existentes, entre a ligação da ONU do utilizador até ao OLT (excluindo possíveis *splitters* do próprio CO). Com a alteração deste parâmetro, observamos uma reformulação completa da topologia de rede, seja pelo aumento ou pela diminuição do número de *splitters*, fibra necessária, cartas OLT e mesmo pela alteração do custo de trabalhos de construção civil.

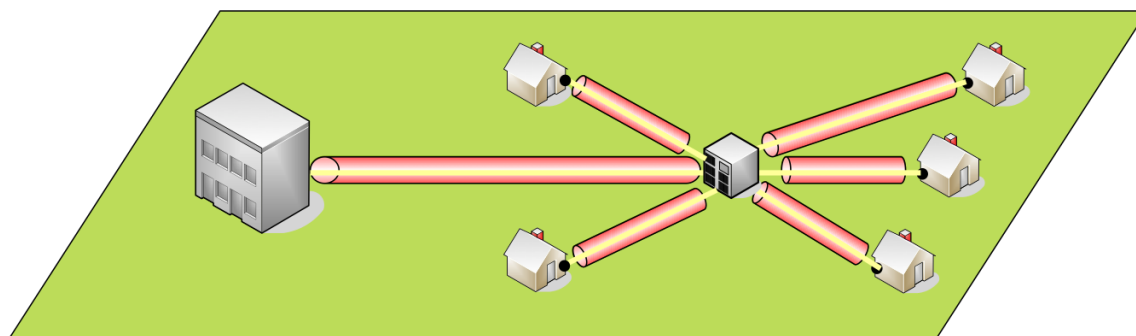


Figura 49 – Distância do ponto de agregação ao central office é um elemento chave na definição da rede [47].

Para efeitos de análise técnico-económica, consideramos dois tipos de rede: um esquema de rede com apenas um degrau de *splitting* e um esquema alternativo com dois níveis de *splitting*. O primeiro caso de estudo, o parâmetro L_1 representa a distância do *splitter* óptico até a ONU, e o parâmetro L_2 a distância do OLT ao referido *splitter*. A soma das distâncias será referida por L .

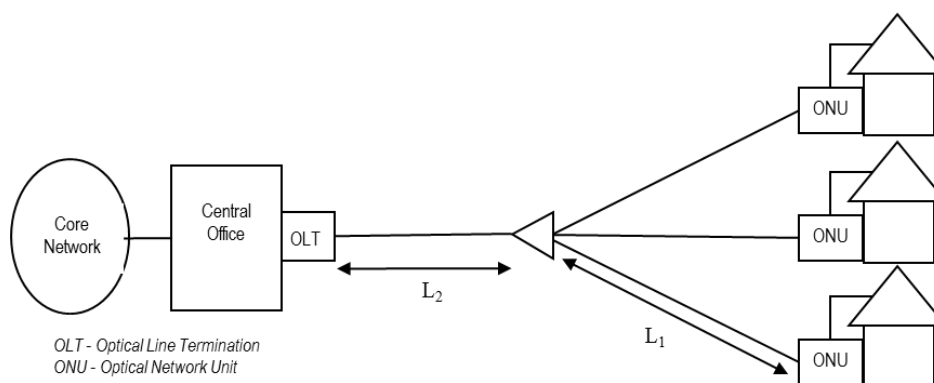


Figura 50 – Configuração FTTH, com um degrau de *splitting* [17].

Relativamente a este caso, a localização do *splitter* em relação a distância L é dado por ρ , definido no intervalo de $[0; 1]$. Este parâmetro toma particular importância, uma vez que um valor baixo de ρ faz aumentar bastante o comprimento total de fibra necessária para a mesma rede, e altos valores de ρ resultam na partilha da mesma fibra por uma distância superior. Diferentes valores de ρ e os custos daí resultantes, serão analisados na **Secção 5.3** deste documento. Na seguinte figura está representado um exemplo das implicações deste parâmetro, para um $L \geq 20\text{km}$.

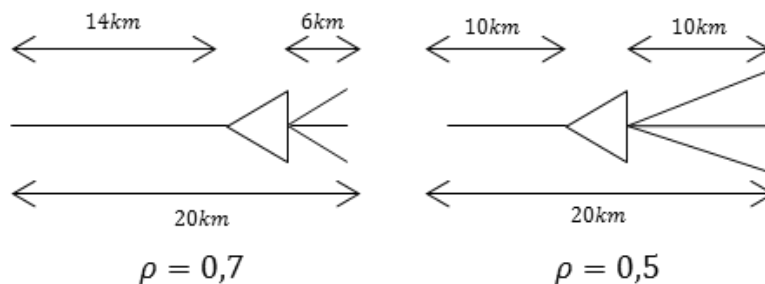


Figura 51 – Impacto do parâmetro ρ [15].

O esquema da rede, que inclui dois níveis de *splitting* (**Figura 52**) é um pouco mais complexo, uma vez que, para além do parâmetro ρ , que define no intervalo de $[0; 1]$ a distância do OLT até à primeira camada de *splitters* (comprimento L_3), torna-se necessário usar também um parâmetro τ que define, no mesmo intervalo de $[0; 1]$, a distância entre o primeiro e o segundo *splitter* (**Figura 53**). A distância relativa entre o ponto de flexibilidade mais próximo do cliente e a sua casa é dada por $1 - \rho - \tau$.

$$\gamma = 1 - \rho - \tau, \gamma \in [0; 1], \rho \in [0; 1], \tau \in [0; 1] \quad (27)$$

Da equação (27) retira-se a conclusão que a soma de ρ e τ não poderá ser superior a 1. De referir que qualquer um dos parâmetros, indicados anteriormente, poderá ser nulo e, nesse caso o degrau de *splitting* estaria no *central office* ($\rho = 0$), ou o segundo degrau encontrar-se-ia na mesma localização física do primeiro ($\tau = 0$). Caso a soma de ρ e τ seja 1, é indicativo que o último degrau de *splitting* se localiza perto da casa do cliente.

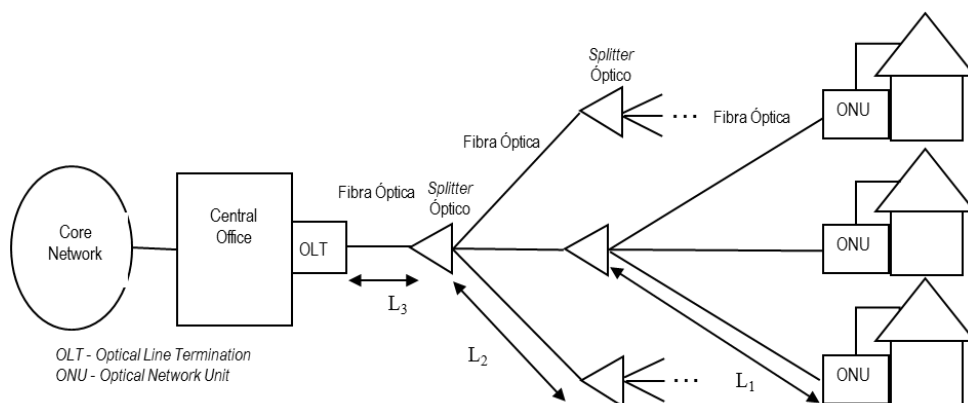


Figura 52 – Esquema de rede com dois degraus de *splitting*. Adaptado de [17].

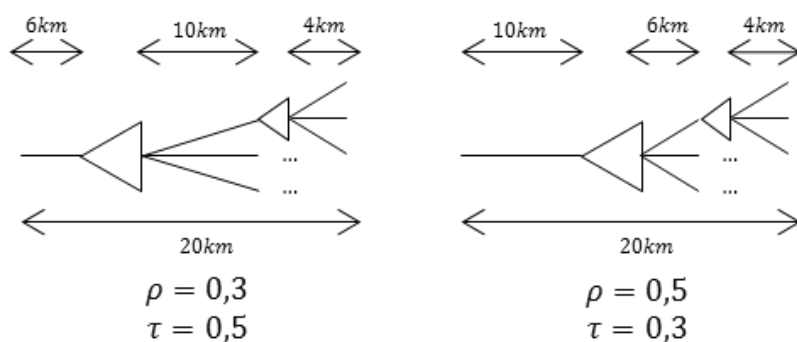


Figura 53 – Impacto do parâmetro ρ e τ . Adaptado de [15].

Da análise da **Figura 52**, é possível observar que o comprimento L_3 corresponde à *feeder network*, ligando o OLT à primeira camada de *splitters*. O comprimento L_2 representa a *distribution network*, ligando ambas as camadas de *splitters*, e o restante L_1 liga a última camada de *splitters* ao cliente final, *drop network*.

4.6 Outros Modelos Geométricos

A existência ou não de infra-estruturas passivas nos locais, onde serão criadas as redes de fibra, é uma condicionante que não poderá ser ignorada, uma vez provado por diversos estudos económicos efectuados em todo o mundo, que a existência de infra-estruturas tem uma influência muito relevante nos custos da rede. Considere-se um exemplo em que existe um novo bairro residencial, e onde há vários loteamentos em construção, numa zona até então desabitada:

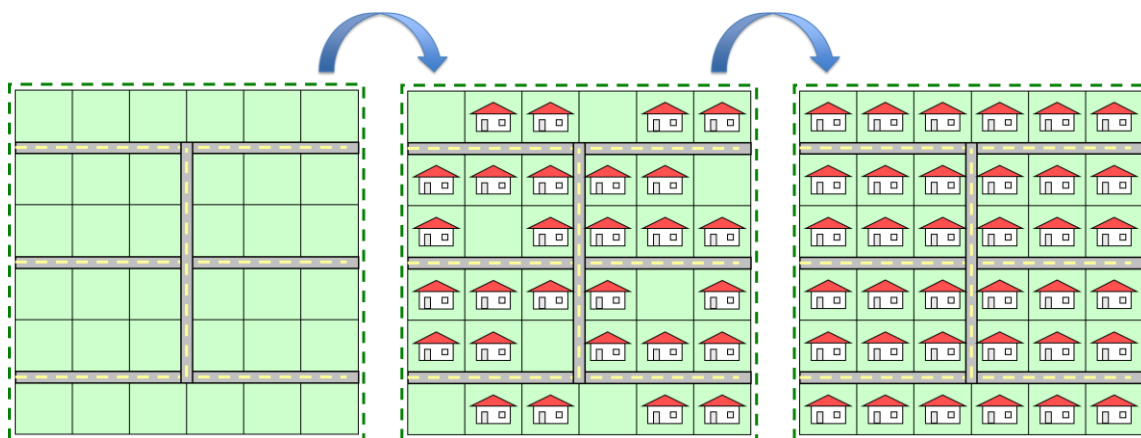


Figura 54 – Evolução da construção dos loteamentos. Adaptado de [47].

- Neste caso serão aproveitados valas já abertas e há partilha de condutas com outros serviços de utilidade pública. Existe no entanto uma outra zona residencial bastante próxima desta nova em construção;
- A construção das infra-estruturas necessárias teria um custo inferior nesta situação, em comparação com a mesma despesa num outro bairro residencial já finalizado e habitado, onde valas teriam de ser abertas e condutas instaladas (**Figura 55**);

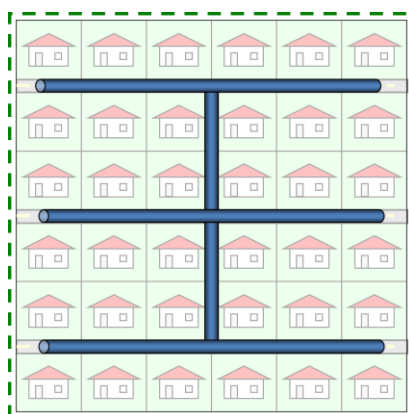


Figura 55 – Condutas para passagem da cablagem [47].

- O operador terá que optar por fazer chegar a rede a partir do nó de acesso existente, ou então criar um novo nó para servir esta nova localização;
- É de prever que o operador escolha precaver o futuro realizando um maior investimento imediato na criação de um novo nó de acesso, partilhando os custos dos trabalhos de construção civil com outras entidades de utilidade pública (águas, luz, etc.), evitando uma intervenção de custos mais elevados no futuro;

- É também verosímil que o operador opte por instalar de imediato fibra escura do nó de agregação até perto da casa dos possíveis clientes, poupando nos elevados custos de instalação posteriores (**Figura 56**);

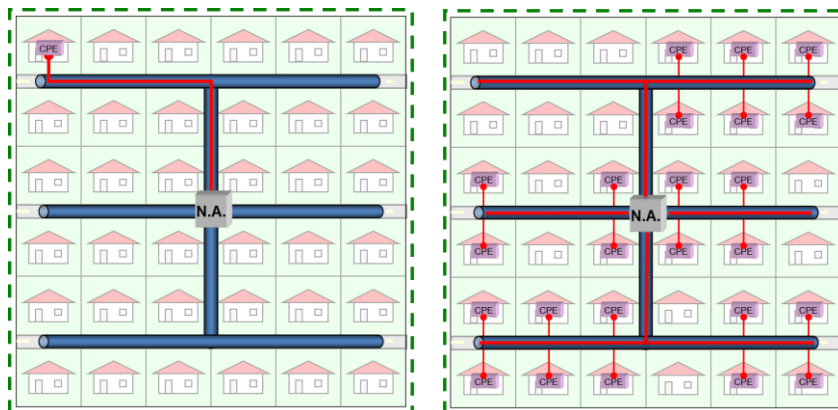


Figura 56 – Opções de instalação: instalação aquando do aparecimento de novos clientes, à esquerda, e instalação preventiva usando fibra escura, à direita. Adaptado de [47].

- Os diferentes nós de agregação estão ligados ao *central office* pela rede *feeder*.

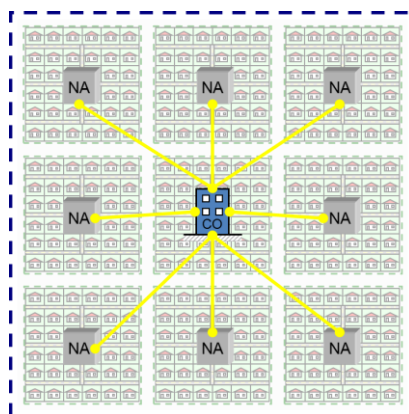


Figura 57 – Representação da ligação *central office* – nó de agregação [47].

Há várias ferramentas de análise técnico-económica que permitem fazer o estudo da problemática dos custos totais de fibra e de condutas. No entanto, alguns dos seus modelos não consideram as variações simples como alteração dos degraus de *splitting* ou *distribuição populacional* e, necessitam assim, de conhecer as localizações concretas dos clientes para questões de custo.

Das diversas ferramentas destaca-se o *TONIC*, resultante do esforço de uma sequência de vários projectos financiados pela União Europeia ao longo de cerca de uma década (*SYNTHESSYS*, *OPTIMUM*, *TITAN*, *TERA* e *TONIC*). A Universidade de Aveiro participou no desenvolvimento destes projectos através do Grupo de Sistemas de Banda Larga [27].

Cada modelo geométrico que será apresentado nas secções seguintes apresenta vantagens e desvantagens:

- TONIC – Apenas poderá ser usado para áreas rectangulares com população dispersa homogeneamente. As ruas e estradas terão de apresentar uma organização paralela e perpendicular entre si.
- SYNTHESIS – Apresenta-se pouco flexível apesar de considerar a densidade populacional a área a servir, a topologia de rede e a disponibilidade de infraestruturas. A ser aplicado em áreas poligonais.
- SYNTHESIS Modificado – Em tudo similar ao modelo SYNTHESIS mas com a adição dos cálculos relativos a rede *feeder*.
- SARDANA – Este modelo tem como objectivo o cálculo dos custos da rede relativamente ao anel da rede SARDANA e suas ramificações em árvore. Apresenta a vantagem única de adicionar os cálculos da rede dentro dos edifícios

4.6.1 TONIC

São diversos os modelos presentes no mercado para o cálculo de custos referentes a vias, condutas e cablagem. Um destes modelos segue metodologia do projecto *TONIC*, descrito no *TONIC Deliverable 7* (2002), em que se assume uma área geográfica rectangular dividida em pequenas áreas distribuídas homogeneamente, se localizam os edifícios residenciais. Todas as casas e edifícios estão ligados por trilhos horizontais ou verticais, ao nó de agregação, onde deverá estar localizado um ou mais *splitters* ópticos, formando assim uma rede em estrela.

Segundo esta metodologia, o dimensionamento da rede usa a média do comprimento da cablagem em cada área para dividir a área geográfica total em segmentos de igual tamanho, tal como se observa na **Figura 57**. Cada segmento da rede de acesso é novamente dividido em n unidades, sendo que cada uma representa um edifício a servir. O resultado é uma área quadrada de lado $a = \sqrt{n}$. Cada edifício tem um número fixo de residências, ligadas directamente ao nó de agregação mais próximo. Esta terminologia geométrica está representada na figura seguinte.

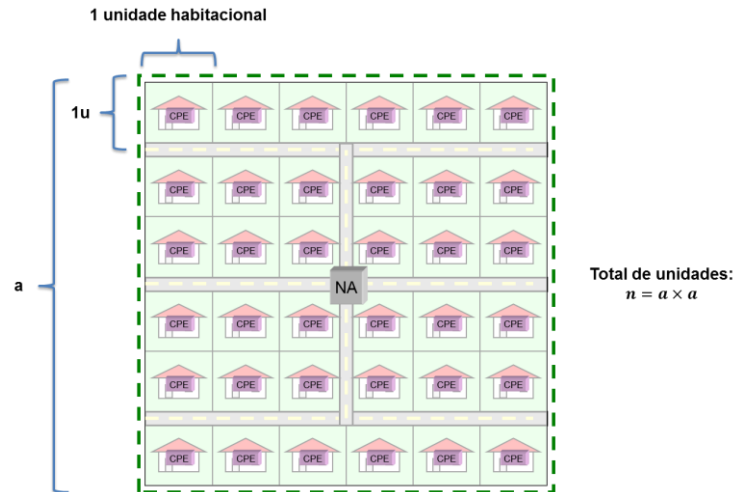


Figura 58 – Terminologia geométrica. Adaptado de [47].

O comprimento das condutas representa o trabalho de construção civil necessário, a nível de escavamentos e perfurações no terreno para instalação das mesmas e respectiva cablagem. Uma conduta ou subconducta não são mais que tubos ou cilindros metálicos (ou de outro material), onde os cabos serão instalados, facilitando a instalação posterior de mais cabos no futuro, sem abertura do pavimento das ruas e estradas. As condutas têm também a capacidade de proteger os cabos. Devido aos custos inerentes à perfuração das estradas e pavimentação, os operadores aproveitam os trabalhos de construção civil de terceiros para instalar infra-estrutura passiva e fibra escura. No caso da rede *feeder*, as condutas terão de possuir uma largura superior às da rede *drop*, onde poderão mesmo ser construídas microcondutas. Usando a mesma terminologia da **Figura 58**, o comprimento total das condutas é dado por:

$$I_d(a) = a^2 - 1 = u(n - 1) \quad (28)$$

O custo de escavação de uma vala varia, maioritariamente, com a geografia do local e do terreno. Tal como nos modelos apresentados anteriormente também o da metodologia *TONIC*, identifica o comprimento requerido para a cablagem como um variável dependente do tamanho da área a servir, da topologia e do posicionamento relativo dos nós de agregação / *splitters*.

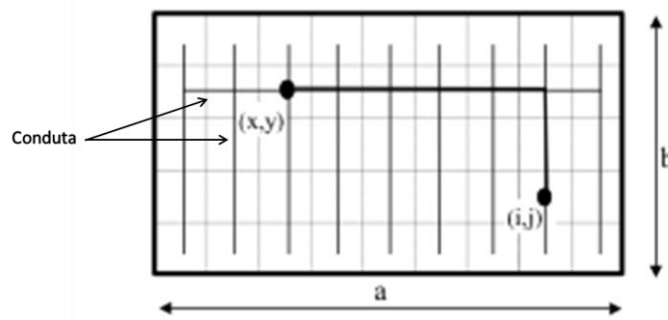


Figura 59 – Coordenadas e caminho entre ponto de flexibilidade e cliente [4].

Observando a **Figura 59** e assumindo novamente que a cablagem é passada pelo caminho mais curto, somente vertical e horizontalmente, numa área de comprimento a e largura b , com as coordenadas na unidade territorial do cliente (i, j) , e as coordenadas do nó de agregação (x, y) , o comprimento total da fibra pode ser calculado por:

$$I_c(a, b, x, y) = \sum_{i=0}^{b-1} \sum_{j=0}^{a-1} [|i - y| + |j - x|]. \quad (29)$$

Onde:

$$x \in [0; a - 1];$$

$$y \in [0; b - 1];$$

O *TONIC Deliverable 7* demonstra que a mesma fórmula pode ser expressa por:

$$I_c(a, b, x, y) = \frac{a}{2} [(b - y - 1)^2 + y^2 + b - 1] + \frac{b}{2} [(a - x - 1)^2 + x^2 + a - 1]. \quad (30)$$

Para a topologia em estrela apresentada anteriormente, numa área de lado a , poder-se-ia simplificar a formulação anterior:

$$I_c(a, b, x, y) = \frac{a^3}{2} = u \times \frac{n^{3/2}}{2}. \quad (31)$$

No entanto, não é fácil o uso da expressão (30), devido à sua complexidade. Assim torna-se mais intuitivo expressar o comprimento dos cabos em função do rácio de distribuição n , da forma da zona a servir s e da posição p . O formato da região faz variar a área total, o que resultará em diferentes resultados, enquanto a posição p ($p \in [0; 1]$) dá a posição relativa do ponto de *splitting* (**Figura 60**).

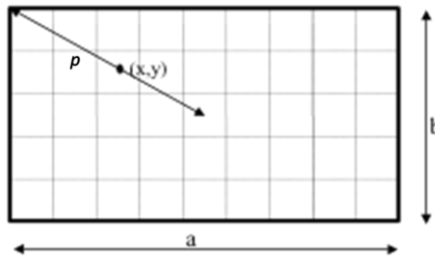


Figura 60 – Modelo da área da metodologia TONIC, com representação da distância p [4].

No caso de $p = 0$, o ponto de flexibilidade está no centro da área, mas no caso de $p = 1$ esse ponto localiza-se no extremo da área. À medida que p cresce, o ponto de distribuição move-se ao longo da seta da figura anterior.

As variáveis a, b, x e y podem ser expressas em função de n, s e p da seguinte forma:

$$a = \sqrt{n \cdot s}; \quad (32)$$

$$b = \sqrt{\frac{n}{s}}; \quad (33)$$

$$x = \frac{\sqrt{n \cdot s} - 1}{2} (1 - p) \quad (34)$$

$$y = \frac{\sqrt{n/s} - 1}{2} (1 - p) \quad (35)$$

Substituindo as fórmulas anteriores em (30), obtém-se o comprimento da fibra em função de n, s e p , para um topologia em estrela. Quanto às topologias em anel ou barramento, a situação é bastante mais simplificada.

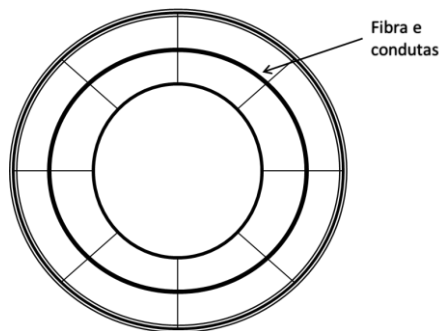


Figura 61 – Topologia em anel ($n = 8$). Adaptado de [4].

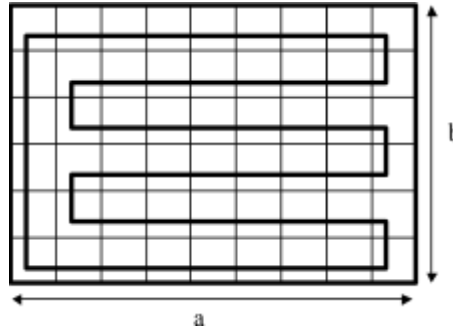


Figura 62 – Área modelo para a topologia em anel ($n=54$) [23].

Para a topologia em anel (**Figura 61**) tem-se:

$$L_{condutas} = n; \quad (36)$$

$$L_{fibra} = n. \quad (37)$$

O comprimento da fibra e condutas é equivalente e igual ao rácio de *splitting* n .



Figura 63 – Topologia em barramento ($n=18$). Adaptado de [4].

Da mesma forma, para a topologia em barramento (**Figura 63**):

$$L_{condutas} = n - 1; \quad (38)$$

$$L_{fibra} = n. - 1. \quad (39)$$

Todas as fórmulas anteriores têm como pressuposto o uso de uma tecnologia PON, onde uma fibra monomodo que sai do *central office* é partilhada por diversos utilizadores a partir do processo de *splitting*.

4.6.2 SYNTHESYS

Outro modelo geométrico usa a metodologia *SYNTHESYS* [4], e apesar de ser pouco flexível, permite obter uma estimativa do comprimento de fibra necessário e respectivas condutas

[illegible]

As ligações entre os pontos $A - B$, $B - C$, $C - E$ e $C - D$, estão contidas na rede de distribuição. Já mais perto do cliente, entre os pontos de flexibilidade D , E e F temos a rede *drop*. Neste modelo não está representada a rede *feeder*.

$$|\overline{AV}|^2 = R^2 = \frac{2N}{d \cdot n \cdot \sin \alpha}. \quad (40)$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n}. \quad (41)$$

d – número de potências utilizadores por km^2 ;
 N – número de potências utilizadores por "fatia" do polígono (A);
 n – número de fibras que saem da central office (A) / número de "fatias" do polígono;
 M – número de pontências utilizadores por ramificação;
 R – raio do polígono;
 α – ângulo agudo da "fatia" do polígono.

$$|\overline{AB}| = |\overline{BC}| = \frac{R}{3} \times \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad (42)$$

$$|\overline{CD}| = |\overline{CE}| = \frac{R}{6} \times \sqrt{1 + 8 \sin^2(\alpha/2)}; \quad (43)$$

$$|\overline{DF}| = R \times \left(0.132 + \frac{0.336}{n} \right). \quad (44)$$

A equação (44) é obtida por simulação, enquanto todas as restantes são obtidas por interpretação geométrica da **Figura 64** [4]. A área da superfície S que corresponde à ramificação é dada por:

$$S = \frac{M}{d}. \quad (45)$$

Aproximando a superfície representada na **Figura 64** a um círculo de área $\pi \cdot r^2$, a distância média b entre o ponto de ramificação e o edifício do cliente é dada por:

$$b = \frac{2r}{3} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{M}{\pi \cdot d}}. \quad (46)$$

Considerando que em média a entrada do edifício do cliente e o ONT/ONU dista de 15m, o comprimento da ramificação é dado por:

$$L_{ramo} = b + 15. \quad (47)$$

Os 15m adicionais são assumidos como interior do edifício e como tal, não entram para contagem de comprimento de condutas. A distância que o cliente está do nó A é:

$$L_{max} = 3|\overline{AB}| + |\overline{CD}|. \quad (48)$$

O comprimento dos cabos e das condutas são, neste modelo geométrico, calculados pela equação anterior, mas, no entanto, é adicionada uma percentagem significativa ao comprimento dos cabos (geralmente 40%), devido a possíveis necessidades na montagem da rede e seu equipamento.

Este modelo poderá ser aplicado a tecnologias PON, e a partir dele surgiram diversas versões melhoradas, nomeadamente o adição da rede *feeder* aos cálculos e análise de redes do tipo estrela-barramento.

4.6.2.1 SYNTHESSYS Modificado

O modelo SYNTHESSYS modificado apresenta-se em tudo similar ao modelo base apresentado anteriormente exceptuando o segmento *feeder*. Agora a rede *feeder* está incluída nos cálculos, tal como mostra a **Figura 65**.

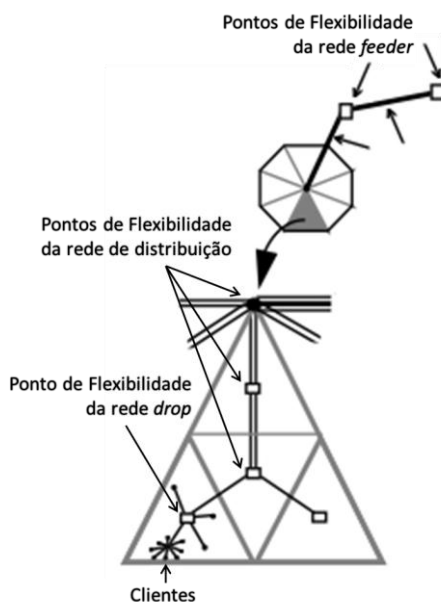


Figura 65 – Modelo SYNTHESSYS modificado. Adaptado de [4].

A rede primária contém dois pontos de flexibilidade e respectivas ligações, onde os comprimentos dos mesmos são dependentes e entram no modelo matemático separadamente [4], não sendo apresentados os seus cálculos neste documento.

Tanto o modelo modificado como o modelo base SYNTHESSYS foram desenvolvidos, tendo por base topologias em estrela. No entanto, é possível aplicar tais modelos a outras configurações de rede, caso sejam feitas as devidas modificações.

4.6.2.2 Modelo Estrela-Barramento

Esta outra variação do modelo SYNTHESSYS adiciona aos últimos níveis de flexibilidade a topologia em barramento, mantendo inalterados os níveis de *splitting* superiores. Até ao último ponto de flexibilidade da rede de distribuição, a topologia é similar aos modelos SYNTHESSYS anteriores, mas os níveis abaixo são do tipo barramento (**Figura 66**).

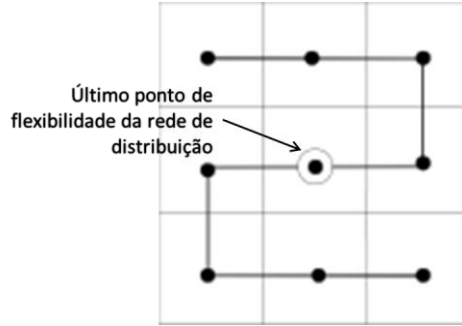


Figura 66 – Barramento de nível superior na arquitectura de rede Estrela-Barramento. Adaptado de [4].

O comprimento do canal de barramento (em *km*) representado na figura acima é dado por:

$$L_{bus} = \frac{1 + \sqrt{N}}{2} \times \sqrt{\frac{N}{d}}. \quad (49)$$

Onde:

d – número de potenciais clientes por km^2 ;

N – número total de clientes.

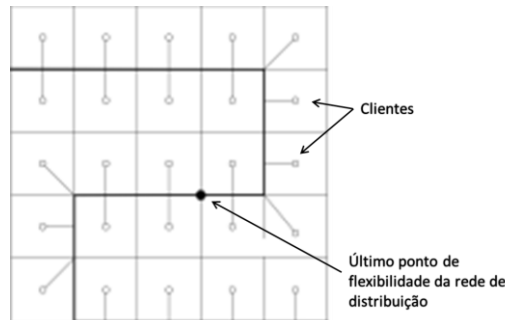


Figura 67 – Representação da ligação do canal de barramento até casa do cliente na arquitectura de rede Estrela-Barramento. Adaptado de [4].

O comprimento do cabo de ligação do canal de barramento até casa do cliente (em *km*) é dado por:

$$L_{b-h} = \frac{1}{\sqrt{d}} \times \left[\frac{1}{2} (N - (\sqrt{N} - 2)) + \frac{1}{2} (\sqrt{N} - 2) \right]. \quad (50)$$

A partir da combinação das equações (42) e (43) do modelo SYNTHESYS inicial e das equações (49) e (50) deste modelo, é possível obter o total do comprimento da cablagem necessária à rede.

4.6.3 SARDANA

Scalable Advanced Ring-based Passive Dense Access Network Architecture ou *SARDANA* é um projecto (7th FP STREP) que tem como objectivo estudar métodos para melhorar o desempenho, escalabilidade e robustez de redes FTTH de grande densidade (principalmente em zonas urbanas), com tecnologia PON. A topologia da rede *SARDANA* é constituído por um anel central WDM, que oferece protecção contínua contra cortes na fibra, com ramificações TDM em árvore, para fazer chegar a fibra mais perto das casas dos clientes (**Figura 68**).

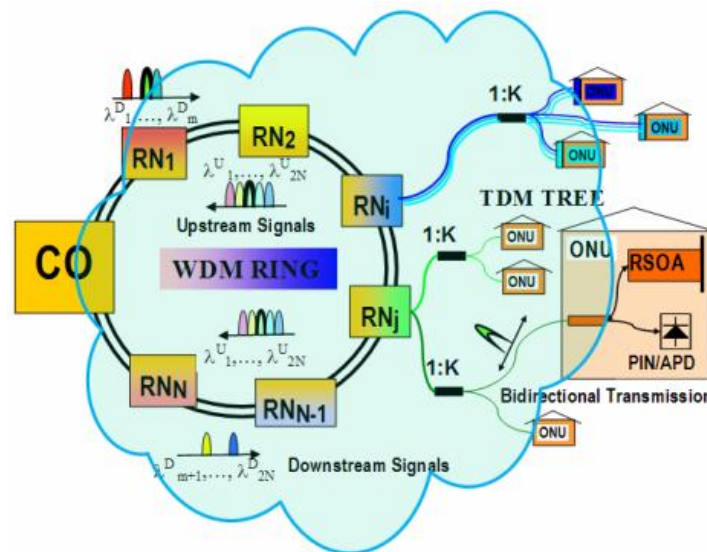


Figura 68 – Topologia da rede SARDANA [47].

Tal como sabido, o custo pode ser afectado pela distribuição geográfica dos clientes e o caminho escolhido para passagem da cablagem por parte do operador [47]. Na **Figura 69** está representado o modelo geográfico simplificado usado para a criação da rede, onde a cablagem óptica é passada pela região rectangular a verde (seguindo ruas e estradas). Este anel principal tem no seu interior nós remotos, cuja função serve cada célula (ou bloco) B_x ou B_y . Existem N_{cx} blocos horizontais e N_{cy} blocos perpendiculares, num total de $2N_{cx} + 2N_{cy} - 4$ blocos, contudo nem todos terão que ser necessariamente servidos. A percentagem total de células ligadas é $CC\%$, mas as restantes são apenas passadas pelo anel, prontas para uma ligação futura. A densidade populacional de cada bloco, servido pelo nó remoto, dependerá da altura média B_z , do número de andares do edifício e da percentagem de área construída.

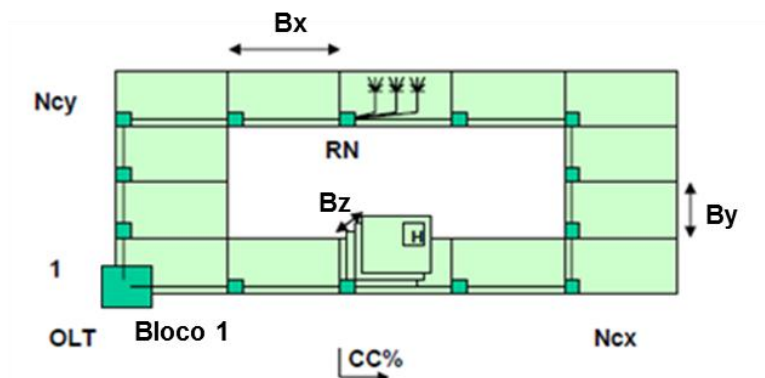


Figura 69 - Modelo Geográfico da metodologia SARDANA [46].

O modelo SARDANA divide a rede em três segmentos: *ring*, *feeder* e *drop*. Assim, para a ligação entre os blocos existe o segmento *ring* (ou anel). Os *splitters* estão ligados ao nó remoto do bloco através da cablagem do segmento *feeder*, onde existe, em parte, partilha da fibra. A distribuição dos *splitters* dependerá da densidade populacional e do rácio usado. Em cada bloco, cada casa terá o seu próprio segmento *drop* proveniente do último *splitter*. O máximo comprimento de fibra que se poderá ter dentro de um bloco (segmento *feeder* e *drop*) é $Bx + By + Bz$.

5. Análise Técnico-Económica de uma solução

FFTH

Pretende-se agora efectuar a análise técnico-económica de uma rede FTTH com tecnologia passiva, dando uso aos conceitos apreendidos anteriormente. Será pressuposto, no que toca à disponibilidade de infra-estruturas passivas e investimento necessário, que:

- Existe disponibilidade total de vias e condutas, ou qualquer outra infra-estrutura necessária para a instalação da cablagem de fibra óptica (para as configurações A, B e C – nas **Secções 5.3**, **5.4**, e **5.5** respectivamente). Para a **Secção 5.6** o pressuposto anterior não será válido;
- O uso dos equipamentos e recursos inerentes ao *Central Office* é exclusivo;
- O investimento será efectuado de um modo faseado, em função da penetração de mercado, para os itens necessários à solução PON:
 - Equipamento do Central Office;
 - *Splitters*;
 - Cablagem do CO até à ONU;
 - Equipamento terminal nas residências do cliente (CPE).

Assim sendo, serão apresentados quatro cenários base: a configuração A com apenas um degrau de *splitting*; a configuração B com dois níveis de *splitting*; a configuração C repete os pressupostos da configuração A, mas adiciona uma outra localização adicional (remota) a servir; a configuração D, onde é considerada a inexistência de infra-estruturas e analisadas as topologias anteriores. Para estes cenários realizar-se-ão análises às repercussões da variação dos diversos tipos de distribuição populacional, parâmetros ρ e τ , rácios de *splitting* e penetrações de mercado. Será, igualmente, feita uma análise ao CAPEX (*Capital Expenditure*) e ao OPEX (*Operational Expenditure*), assim como às receitas e resultados. Apresentar-se-ão os indicadores económicos VAL (Valor Actualizado Líquido), TIR (Taxa Interna de Rentabilidade) e o tempo de recuperação (*payback*). Assume-se que o projecto tem uma duração de 10 anos.

5.1 Ferramenta de Cálculo

Para efectuar esta análise, utilizou-se uma ferramenta de cálculo baseada em *Microsoft Excel* [17]. Para cada configuração, está previamente estabelecido um cenário base que engloba os vários parâmetros de entrada necessários (**Figura 70**).

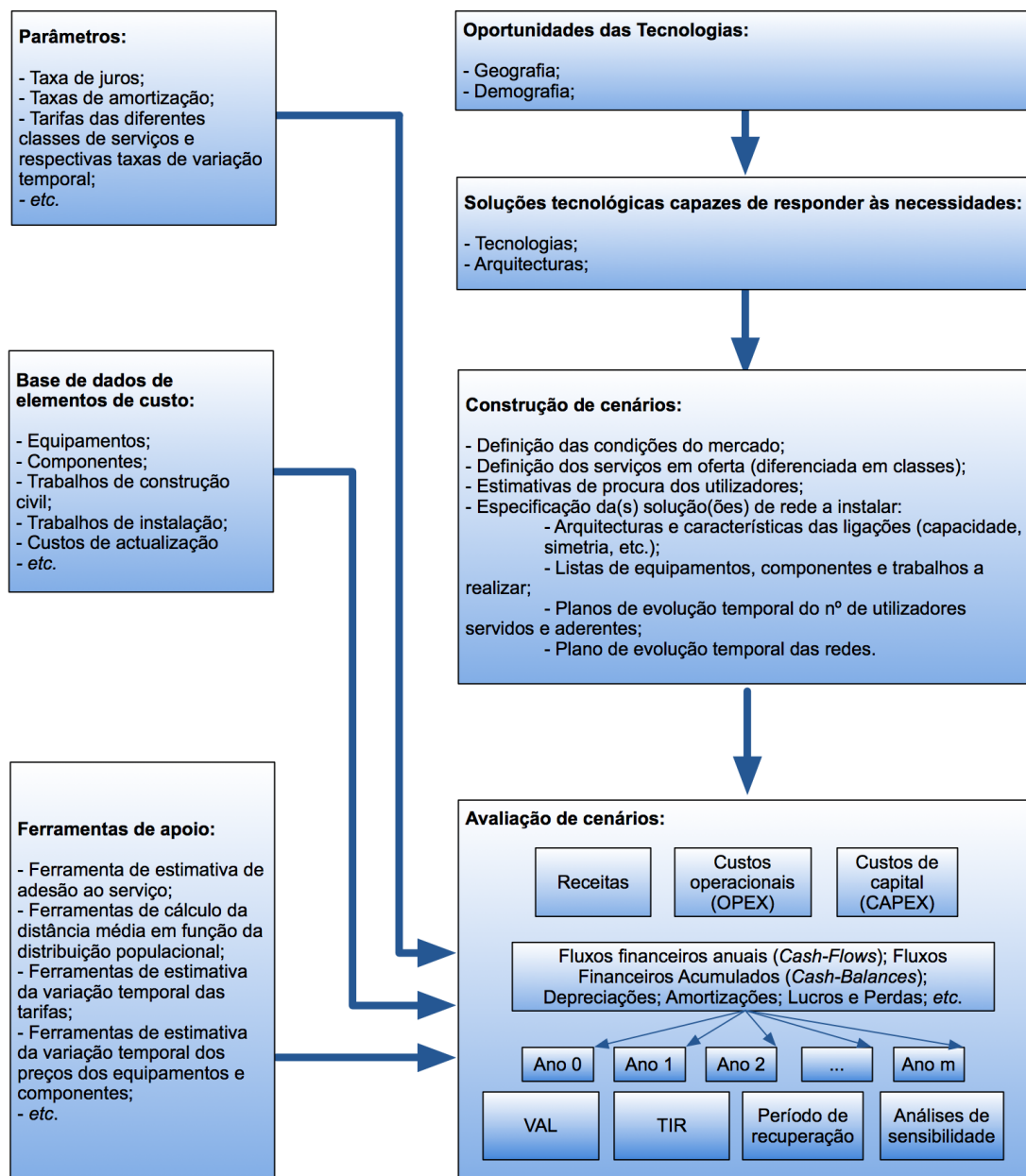


Figura 70 – Estrutura da ferramenta de análise técnico-económica [17].

5.1.1 Parâmetro de Entrada

São necessários diversos parâmetros de entrada para o correcto funcionamento da ferramenta de cálculo. De salientar a taxa de penetração de mercado e o número de potenciais assinantes, alvo de evolução ao longo dos anos, dependendo da referida taxa, que se assume poder ser expressa à custa da seguinte curva logística [17]:

$$P_t = P_i + (P_f - P_i) \frac{1}{1 + \alpha e^{\beta t}}. \quad (51)$$

onde:

P_t – Penetração em função do tempo (t);

P_i – Penetração inicial (unidade de tempo 0);

P_f – Penetração final (última unidade de tempo);

α – Parâmetro de controlo do momento de arranque do mercado;

β – Parâmetro de controlo da velocidade de arranque do mercado;

Tal como é possível aferir da análise da equação (51), a penetração do mercado depende da taxa inicial de penetração, da taxa final e dos parâmetros α e β . Este tipo de curva logística em “S” permite obter uma ideia geral (e também algum controlo) sobre a velocidade de penetração, assim como sobre a quantidade final, ou taxa de saturação, de clientes. Um exemplo deste tipo de curvas está ilustrado no gráfico da **Figura 71**.

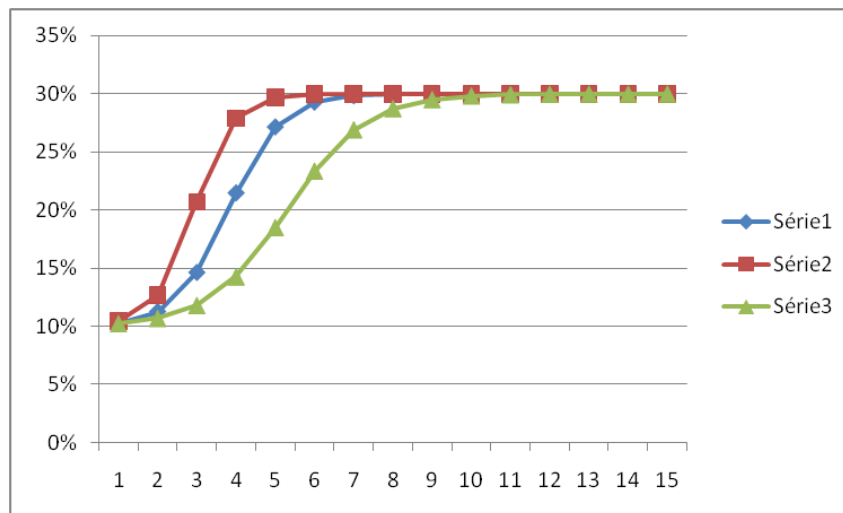


Figura 71 – Curva logística em “S” representando três tipos de penetrações de mercado, para 15 unidades de tempo.

5.1.2 Elementos de Custo da Rede

Os custos totais da rede [15] são dados por:

$$C_T = C_{OLT} + C_{ONU} + C_S + C_F \quad (52)$$

Onde:

C_{OLT} – Custo do OLT;

C_{ONU} – Custo do ONU;

C_S – Custo dos splitters;

C_F – Custo da fibra.

O custo do OLT [15], na sua configuração base, com 16 cartas OLT e com 4 portas em cada carta (perfazendo um total de 64 redes), terá um custo de:

$$C_{OLT_64} = 95000€, \quad (53)$$

no entanto, é recurso comum utilizar um *splitter* 1:2 dentro do próprio *central office*. Com a utilização deste periférico, cada OLT verá a sua capacidade duplicada, aumentando o custo em 5000€:

$$C_{OLT_128} = 100000€. \quad (54)$$

A adição desta bateria de *splitters* dentro do próprio CO, não será considerada como degrau de *splitting*, nem entrará no cálculo do *link budget*.

O custo inicial da ONU é:

$$C_{ONU} = 115€. \quad (55)$$

O investimento total a realizar em *splitters* ópticos, para o caso de apenas um degrau, provém de:

$$C_{S1} = C_{s_N} \times \frac{H}{N}. \quad (56)$$

onde:

C_{s_N} – Custo unitário do *splitter* com rácio N ;

H – Número de potenciais assinantes;

N – Rácio de *splitting*.

Para a configuração com dois degraus:

$$C_{S2} = C_{s_{N2}} \times \frac{H}{N_2} + C_{s_{N1}} \times \frac{H/N_2}{N_1}. \quad (57)$$

onde:

$C_{s_{N1}}$ – Custo unitário do splitter, do primeiro degrau, com rácio N_1 ;

$C_{s_{N2}}$ – Custo unitário do splitter, do segundo degrau, com rácio N_2 ;

N_1 – Rácio de *splitting*, do primeiro degrau;

N_2 – Rácio de *splitting*, do segundo degrau.

O custo da cablagem de fibra óptica, para o caso de haver apenas um degrau de *splitting*, é dado por:

$$C_F = C_{f_feeder} \times \rho \times \langle L \rangle_{real} \times N^o OLT + C_{f_drop} (1 - \rho) \times \langle L \rangle_B \times N^o Splitters. \quad (58)$$

onde:

C_{f_feeder} – Custo do cabo de fibra por km, para o segmento de rede feeder;

C_{f_drop} – Custo do cabo de fibra por km, para o segmento de rede drop;

$\langle L \rangle_{real}$ – Distância média do OLT ao ONU do cliente;

ρ – distância relativa do OLT ao splitter;

Para a configuração com dois degraus:

$$C_F = C_{f_feeder} \times \rho \times \langle L \rangle_{real} \times N^o OLT + C_{f_distrib} \times \tau \times \langle L \rangle_{real} \times N_1 + \quad (59)$$

$$C_{f_drop} \times (1 - \rho - \tau) \times \langle L \rangle_{real} \times N_2.$$

onde:

C_{f_feeder} – Custo do cabo de fibra por km, para o segmento de rede feeder;

$C_{f_distrib}$ – Custo do cabo de fibra por km, para o segmento de rede de distribuição;

C_{f_drop} – Custo do cabo de fibra por km, para o segmento de rede drop;

$\langle L \rangle_{real}$ – Distância média do OLT ao ONU do cliente;

ρ – distância relativa do OLT ao splitter do primeiro degrau;

τ – distância relativa do OLT ao splitter do segundo degrau;

$N^o OLT$ – número de OLT.

O preço dos equipamentos usados para a criação da rede constam da **Tabela 3** e são relativos ao momento inicial do projecto de investimento.

Tabela 3 – Preço inicial do equipamento utilizado.

Equipamento	Preço
Cabo 1FO ($C_{f,1}$)	330€
Cabo 48FO ($C_{f,48}$)	1150€
Cabo 96FO ($C_{f,96}$)	2000€
Cabo 288FO ($C_{f,288}$)	4500€
Splitter 1:4 ($C_{s,4}$)	91€
Splitter 1:8 ($C_{s,8}$)	135€
Splitter 1:16 ($C_{s,16}$)	245€
Splitter 1:32 ($C_{s,32}$)	360€
Splitter 1:64 ($C_{s,64}$)	500€

No entanto, é fácil perceber que estes valores sofrem uma evolução ao longo do período de estudo. O valor de cada equipamento estará sujeito a uma erosão com o tempo, seja pelo aparecimento de melhores tecnologias, novos e melhores produtos com a mesma funcionalidade ou redução dos custos de fabrico. É comum simplificar este processo e utilizar uma taxa de erosão da qual resultará, de forma idêntica para todas as tecnologias, uma variação com uma forma idêntica ao inverso de uma função exponencial. A utilização deste método, muito simplista, apenas consegue controlar o parâmetro, a partir do qual irá evoluir a velocidade de erosão e o valor de tendência do preço final do equipamento.

O método, que aqui se pretende representar, classifica o tipo de equipamentos em classes, distinguidos por dois parâmetros distintos, tipo de equipamento (K) e a sua maturidade no mercado [17]. A alteração do preço do equipamento, em função da sua classe, está representada da seguinte fórmula.

$$P(t) = P(0) \left[n_r(0) \left(1 + \exp \left\{ \ln \left[\frac{1 - n_r(0)}{n_r(0)} \right] - \left[\frac{2 \ln(9)}{\Delta T} \right] t \right\} \right) \right]^{-\ln(K)/\ln(2)} \quad (60)$$

onde:

t – unidade de tempo ;

$P(0)$ – Preço inicial do equipamento;

$n_r(0)$ e ΔT – Parâmetros relativos a maturidade do equipamento;

K – Parâmetro relativo a curva de aprendizagem da classe do equipamento.

Através da alteração dos parâmetros $n_r(0)$ e ΔT , podem ser definidas as classes de maturidade dos vários equipamentos, isto é, ao atribuir valores tabelados para estas variáveis

(**Tabela 4**), a velocidade de erosão de um determinado equipamento irá evoluir segundo uma curva em “S”, já conhecida.

Tabela 4 – Maturidade do equipamento utilizado [8].

Classe	Equipamento	$n_r(0)$	ΔT
Maduro, médio	1/48/96/288 FO	0,1	10
Emergente, lento	Splitters 1:64	0,001	20
Emergente, muito lento	ONU	0,001	40

Outro parâmetro, que pode ser controlado, é K . Este identifica qual o tipo de equipamento a tratar (equipamento electrónico, equipamento de construção civil ou mesmo equipamento de telecomunicações).

Tabela 5 – Classes da curva de aprendizagem K utilizadas [8].

Classe	Equipamento	K
Cabos de fibra	1/48/96/288 FO	0,9
Componentes Ópticos Passivos	Splitters 1:64	0,8
Electrónica	ONU	0,8

Os resultados da aplicação da formulação (60), para o equipamento necessário, estão representados na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Evolução do preço dos componentes.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cabo 1FO	330 €	311 €	295 €	280 €	268 €	258 €	251 €	245 €	241 €	238 €
Cabo 48FO	1.150 €	1.085 €	1.027 €	976 €	934 €	900 €	874 €	854 €	840 €	830 €
Cabo 96FO	2.000 €	1.886 €	1.785 €	1.698 €	1.625 €	1.566 €	1.520 €	1.486 €	1.461 €	1.444 €
Cabo 288FO	4.500 €	4.244 €	4.017 €	3.821 €	3.656 €	3.523 €	3.420 €	3.343 €	3.287 €	3.249 €
ONU	115 €	111 €	107 €	103 €	100 €	96 €	93 €	90 €	87 €	84 €
Splitter 1:64	500 €	466 €	434 €	405 €	377 €	351 €	327 €	305 €	284 €	265 €
Splitter 1:32	360 €	335 €	313 €	291 €	271 €	253 €	236 €	220 €	205 €	191 €
Splitter 1:16	245 €	228 €	213 €	198 €	185 €	172 €	160 €	149 €	139 €	130 €
Splitter 1:8	135 €	126 €	117 €	109 €	102 €	95 €	88 €	82 €	77 €	72 €
Splitter 1:4	91 €	85 €	79 €	74 €	69 €	64 €	60 €	56 €	52 €	48 €

Importante, ainda, referir que os custos relativos ao OLT não são alvo de estudo, no que toca à erosão, de modo a simplificar o grau computacional deste estudo económico. O facto de o custo dos diversos equipamentos constituintes do OLT pertencerem a diferentes classes, resultaria num grande aumento de complexidade da ferramenta de cálculo da variação temporal do preço dos equipamentos.

Para a consideração de um cenário de inexistência de infra-estruturas passivas também os custos de implementação das mesmas terão de ser reconhecidos. Com o intuito de descrever a

totalidade de uma rede FTTH, é necessário identificar todos os seus elementos e respectiva infra-estrutura:

Tabela 7 – Descrição dos elementos de infra-estrutura necessários para uma rede FTTH [46].

Elemento da Rede	Infra-estrutura Física
<i>Central Office</i>	Central, ou pequeno edifício, com sala de comunicações
<i>Rede Feeder</i>	Cablagem de grande largura e infra-estrutura de suporte (valas, condutas ou postes).
Primeiro Ponto de Agregação	Subterrâneo de fácil acesso ou compartimento num poste ou cabine externa com facilidade de distribuição da cablagem
Rede de Distribuição	Cablagem de largura média e infra-estrutura de suporte (valas, condutas ou postes).
Segundo Ponto de Agregação	Pequenos espaços subterrâneos de fácil acesso, pequeno compartimento num poste ou pequena cabine externa com a capacidade de guardar grande quantidade cabos da rede <i>drop</i> .
<i>Rede Drop</i>	Cablagem de pequena dimensão e infra-estrutura de suporte (micro-condutas ou tubagem).
Cablagem Interna	Cablagem do exterior e interior do edifício e respectivo material de suporte e protecção, equipamento terminal. Os custos referentes a instalações nos edifícios não são tidas em conta neste documento.

Considere-se, assim, que serão utilizadas duas opções, no que toca a infra-estruturas para passagem de fibra, cujos preços são os seguintes:

Tabela 8 – Preços das infra-estruturas utilizadas para cablagem [46].

Infra-estrutura Física	Preço
Valas	17500€/km
Condutas	50000€/km

- **Valas** – nesta situação a cablagem não se encontra protegida, sendo apenas escavadas valas para a passagem dos cabos, sendo estes subterrâneos sem qualquer protecção adicional. Esta opção torna o acesso e a manutenção do equipamento bastante mais custosa, no entanto tem um preço de construção mais acessível. Ainda é importante referir que na realidade, os cabos de fibra usados nestas situação apresentam melhor qualidade, com um revestimento aumentado, de

modo a conseguirem sustentar os agentes externos do meio. No entanto, estes custos extraordinários em cablagem foram ignorados;

- **Condutas** – a utilização desta infra-estrutura tem a principal vantagem de tornar acessível a manutenção do equipamento instalado, e possibilita ainda a introdução e remoção da cablagem. Além disso, a cablagem encontra-se protegida de agentes externos mas requer, no entanto, um custo de instalação bastante superior à opção anterior.

Também, no que toca a caixas de visita, para instalação de pontos de flexibilidade, serão utilizadas dois tipos, com os respectivos preços:

Tabela 9 – Preço das opções de caixa de visita utilizadas [46].

Infra-estrutura Física	Preço unitário
Subterrânea (grande)	350€
Subterrânea (pequena)	280€
Superfície	70€

- Caixas de Visita Subterrâneas (grandes) – utilizadas em cenários urbanos com apenas um degrau de *splitting* no ponto de flexibilidade ou no cenário com dois degraus no primeiro ponto de flexibilidade;
- Caixas de Visita Subterrâneas (pequenas) – utilizadas em cenários urbanos na configuração com dois degraus de *splitting* no ponto de flexibilidade mais próximo do cliente;
- Caixas de Visita de Superfície – utilizadas em zonas suburbanas, rurais e zonas industriais.

Considerou-se que cada caixa de visita suporta até 9 *splitters* [46], podendo este valor variar bastante de operador para operador.

As diversas tarifas e taxas consideradas como parâmetros de entrada, para este exercício económico, são apresentadas na **Tabela 10**:

Tabela 10 – Taxas e tarifas relevantes

Taxa de depreciação	10%
Custo por utilizador	120€
%CAPEX_{Acumulado}	10%
Custo Anual Inicial	550€
Erosão	5%
Taxa de Juro Anual	5%

5.1.3 Critérios de Avaliação

5.1.3.1 CAPEX

CAPEX é, por definição, uma despesa associada à implementação ou extensão de activo fixo (como infra-estrutura), sujeito a depreciação durante a vida económica de um projecto de investimento [26]. Assim, existe um valor residual associado a estas despesas. Conhecer o valor do CAPEX é basilar para o planeamento de novos investimentos, tais como: expansão dos serviços disponibilizados ou melhoria dos existentes. A sua análise é geralmente, baseada em requisitos físicos e lógicos. A construção de uma rede, a implementação de novos elementos de rede e a aquisição de *software* ou *hardware* que permitam determinados serviços, por exemplo, envolve importantes quantias que devem sempre ser tidas em conta.

No caso de estudo que se pretende estudar, o CAPEX resultará da soma dos investimentos para implementação da rede, sendo dado pela equação (52). Será também apresentado, o investimento anual acumulado e o valor acumulado depreciado. A depreciação do fruto da utilização dos activos fixos, ou seja, do equipamento já adquirido, ocorrerá a uma taxa de 10% ao ano, para qualquer classe de equipamento. Assim:

$$\text{Investimento acumulado}_{\text{ano } 0} = \text{Investimento}_{\text{ano } 0}; \quad (61)$$

$$\text{Investimento acumulado}_{\text{ano } M} = \text{Investimento}_{\text{ano } M} + \text{Investimento}_{\text{ano } M-1}; \quad (62)$$

$$\text{Investimento acumulado (depreciado)}_{\text{ano } 1} = \text{Investimento}_{\text{ano } 1}; \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \text{Investimento acumulado (depreciado)}_{\text{ano } M} = & \text{Investimento}_{\text{ano } M-1} \times \\ & (1 - \text{Taxa de depreciação}) + \text{Investimento}_{\text{ano } M}. \end{aligned} \quad (64)$$

É importante referir que o investimento inicial é considerado concretizado no “Momento 0”, ou seja, antes do início da actividade económica. Nesse momento é feito o investimento necessário para o arranque do projecto, de molde a que no primeiro período de tempo do exercício económico, seja possível fornecer os serviços pretendidos para o valor inicial de mercado (neste caso penetração inicial de 10% da população total). Também nos períodos de tempo seguintes, o investimento é executado no período anterior para ser possível servir o número de clientes expectável do período seguinte, de acordo com a curva “S” de evolução do mercado.

O CAPEX representa efectivamente o custo em equipamento por parte do operador, mas no entanto cada intervenção ou instalação de novo material tem um custo associado, independente do tamanho da intervenção, e que foi, até este ponto, ignorado. Surge então a necessidade por parte do operador em fasear e dimensionar as intervenções, de modo a minimizar os custos totais envolvidos.

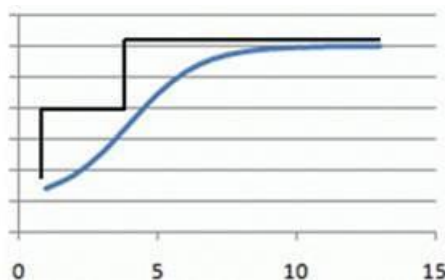


Figura 72 – Faseamento de intervenções de incremento da capacidade de uma rede [18].

Foi assim criada uma função na ferramenta *Microsoft Excel* que permite ajustar os casos de estudo a uma abordagem mais próxima da realidade, no que toca ao faseamento do investimento, ao invés de um investimento ao ritmo do crescimento do mercado. Seguem-se os seguintes pressupostos [18]:

- As intervenções são feitas em tempo discreto, proporcional a uma unidade de tempo de base (neste caso anos);
- As intervenções têm uma dimensão mínima, e serão sempre majoradas por uma margem de segurança μ ;
- Poderá ser necessário ter diferentes regimes de faseamento das intervenções em diferentes partes da rede;
- A primeira intervenção é feita no instante t_o imediatamente antes do arranque do projecto.
- Considera-se que o tamanho de cada intervenção, Δ_k (tamanho da intervenção ou investimento no tempo k) é guiada pela estimativa de evolução do mercado (curva contínua na **Figura 72**) entre 2 instantes predefinidos, um antes e o outro depois de t_k . O intervalo entre estes 2 instantes é parametrizável.

Para ilustrar estes pressupostos poder-se-á atender a **Figura 73**.

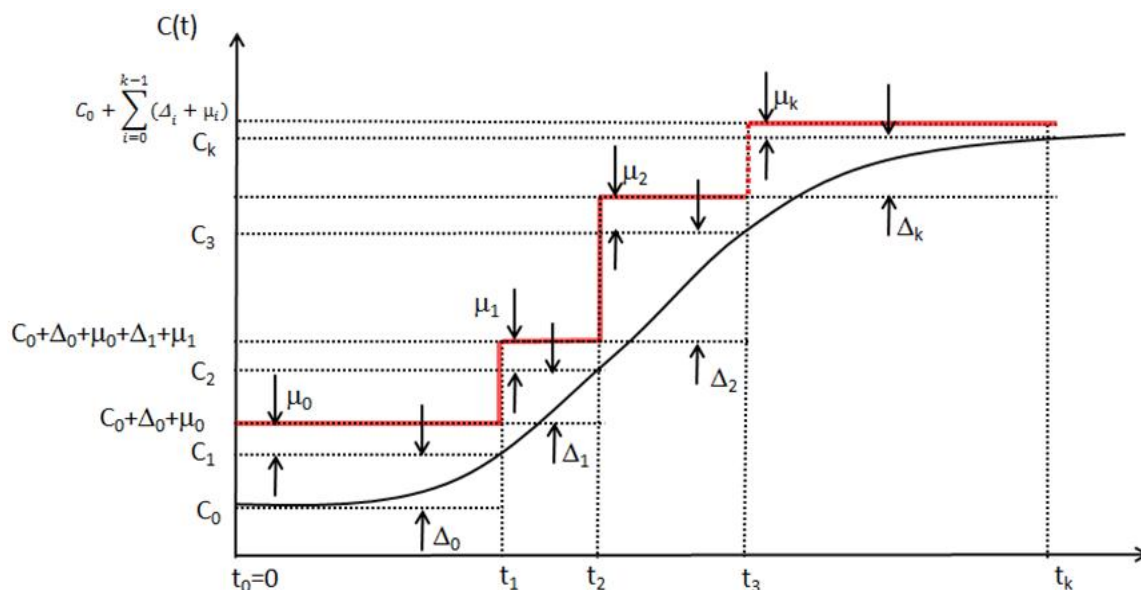


Figura 73 - Aproximação de uma função de capacidade contínua através de uma função discreta [18].

Na função criada usaram-se os seguintes valores:

- μ_0 – taxa de instalação inicial – 20% do mercado;
- Δ – intervalo por instalação – 15% do mercado;
- μ – 5%
- Custo de intervenção – 20.000€.

O resultado do uso da metodologia anterior será usado para calcular o investimento acumulado e depreciado (usando as formulações (62) e (64)), necessário para o cálculo do custo por casa passada.

5.1.3.2 OPEX

OPEX define-se como o factor indispensável necessário, para manter o negócio ou o equipamento activo e despesas para manter os serviços activos e funcionais [26]. Estas despesas não têm com objectivo aumentar os activos da empresa e não estão sujeitas a depreciação, pois uma vez realizadas, não têm qualquer valor residual.

De uma forma geral, o OPEX pode ser definido como todos os elementos de custo numa análise de *cash-flow* que não sejam CAPEX. No entanto, em certas situações, dúvidas poderão surgir na classificação de uma despesa como CAPEX ou OPEX. Por exemplo, toda a despesa na aquisição de equipamento é definida como CAPEX, mas a operação e manutenção de tais sistemas, custos de mão-de-obra associados e custos com licenças de passagem são considerados como OPEX.

Para calcular o OPEX anual, foi usada a seguinte fórmula:

$$OPEX = \%CAPEX_{Acumulado} \times Investimento\ faseado\ acumulado + (Custo/Utilizador) \times N^{\circ}Utilizadores. \quad (65)$$

Onde:

$\%CAPEX_{Acumulado}$ – Percentagem de CAPEX Acumulado depreciado anual, 10%;

$Custo/Utilizador$ – Custos operacionais anuais por utilizador;

$N^{\circ}Utilizadores$ – número actualizado de clientes.

5.1.3.3 Receitas

As receitas definem o valor monetário que entrará na empresa pela prestação de serviços que se propõem fazer e, como é óbvio, dependem directamente do modelo e dos níveis de tarifas aplicados. Assim sendo, uma das primeiras acções de *marketing* são os tarifários de cada operador, que os ajudam a chegar aos seus objectivos principais: diminuir o período de recuperação, ou aumentar o retorno de um investimento (maximizar lucros) e ganhar maior quota de mercado.

Para calcular o valor anual das receitas, é necessário calcular o custo anual actualizado do serviço para o cliente; para isso foi usada a seguinte fórmula:

$$Custo/ano_{ano\ 1} = 550\text{€}; \quad (66)$$

$$Custo/ano_{ano\ M} = Custo_{ano\ M-1} - (Custo_{ano\ M-1} \times \%Erosão). \quad (67)$$

Onde:

$Custo_M$ – Custo do serviço no ano actual, com $M > 1$;

$Custo_{M-1}$ – Custo do serviço no ano anterior, com $M > 1$;

$\%Erosão$ – valor da erosão anual do serviço.

Conhecendo este dados, é possível calcular o volume de receitas ao longo do período em estudo, através da seguinte expressão:

$$Receitas = N^{\circ}Utilizadores \times Custo/ano_{ano\ M}. \quad (68)$$

5.1.3.4 Cash-Flow

O *cash-flow* corresponde aos fluxos de caixa (tesouraria) ou seja, compreende os recebimentos (*cash inflows*) e os pagamentos (*cash outflows*), ao longo de um período de tempo definido. No cálculo do *cash-flow*, são também considerados outros parâmetros, como os resultados antes de impostos e amortizações. No entanto, não serão tidos em conta neste exercício económico, uma vez que foram ignorados os impostos sobre lucros.

Conhecendo os valores, tanto de OPEX e CAPEX (usando os valores do investimento faseado), como das receitas, é possível apurar assim o fluxo líquido de cada ano M :

$$\text{Fluxo Líquido Anual}_M = -\text{OPEX}_M + \text{Receitas}_M. \quad (69)$$

Sendo:

OPEX_M – custo operacional anual;

Receitas_M – receitas anuais.

O fluxo líquido acumulado, no ano M , ao longo do exercício económico, é dado por:

$$\text{Fluxo Líquido Acumulado}_1 = \text{Fluxo Líquido Anual}_1; \quad (70)$$

$$\text{Fluxo Líquido Acumulado}_M = \text{Fluxo Líquido Anual}_M + \text{Fluxo Líquido Acumulado}_{M-1}. \quad (71)$$

Conhecendo estes dados, poderá efectuar-se o balanço ao longo do mesmo período. Para o fazer é necessário recorrer às seguintes fórmulas, sabendo que $M > 1$:

$$\text{Balanço}_M = \text{Fluxo Líquido Acumulado}_M + \text{Investimento Faseado Acumulado}. \quad (72)$$

São vários os critérios da avaliação de investimento que um operador deverá ter em conta no momento de decidir a viabilidade de um projecto de investimento [7][17]:

- Valor Actual Líquido (VAL);
- Período de recuperação (*payback*);
- Rendibilidade média do valor contabilístico;
- Taxa Interna de Rentabilidade (TIR).

O VAL é o valor actual dos recebimentos esperados deduzido dos investimentos realizados utilizando uma taxa de desconto conhecida por custo de oportunidade do capital ou taxa mínima de rendibilidade do projecto exigida pelo investidor para implementar um projecto de investimento [7]:

$$VAL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^M}; \quad (73)$$

$$Factor\ de\ Actualização = \frac{1}{(1+r)^M} \quad (74)$$

Sendo:

M – tempo de vida útil do projecto (em anos);

I_0 – investimento inicial (momento 0);

CF – fluxos monetários ou cash flow do projecto;

VR – valor residual a considerar no ano de desinvestimento;

r – taxa de juro ou taxa de desconto.

Relativamente à expressão do VAL, registe-se que, no caso de não existir valor de mercado para os bens, deverá considerar-se como valor residual o valor líquido contabilístico (VR). Neste caso de estudo assume-se que é zero. Quanto aos fluxos monetários do projecto (*cash flows*) para cada um dos anos da vida útil do projecto consideram o montante de investimento previsto para os anos posteriores ao momento zero (I_0).

O critério de decisão relativamente ao VAL segue as seguintes premissas:

- $VAL > 0$ – aceitar o projecto. Um VAL positivo permite recuperar o investimento realizado e remunerar os capitais investidos à taxa pretendida.
- $VAL < 0$ – rejeitar o projecto porque não é economicamente viável.

Os operadores exigem frequentemente que a despesa prevista para o projecto seja recuperada dentro de um determinado período de tempo. O período de recuperação de um projecto obtém-se calculando o número de anos que decorrerão até os fluxos de tesouraria acumulados previstos igualarem o investimento do projecto [7].

Outro indicador, não tão comum em projectos de telecomunicações, é a taxa de rentabilidade contabilística. Para calcular a taxa de rentabilidade contabilística é necessário dividir os lucros previsionais médios de um projecto, depois de amortizações e impostos, pelo valor médio contabilístico do investimento. Este rácio é, então, comparado com a taxa de rentabilidade contabilística da empresa como um todo ou comparada com um padrão externo à empresa, tal como a média da taxa de rentabilidade da respectiva indústria.

A Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) usa-se frequentemente em finanças e é, conjuntamente com o VAL, um dos indicadores mais respeitados e recomendados em textos financeiros. Define-se como a taxa de actualização que torna o $VAL = 0$. Isto significa que para encontrar a TIR de um projecto que dure M anos, deve-se resolver a seguinte expressão [7]:

$$VAL = -I_0 + \frac{CF_1}{1 + TIR} + \frac{CF_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{CC_M}{(1 + TIR)^M} = 0. \quad (75)$$

O critério de decisão relativamente à TIR segue as seguintes premissas:

- $TIR \geq r$: o projecto é economicamente viável.

Utilizando as ferramentas do *Microsoft Excel*, é possível calcular facilmente três dos principais indicadores do projecto de investimento: VAL, TIR e *payback*. Para o efeito, considerou-se a taxa de juro de 5%.

O custo por casa passada e custo por casa servida são também dados importantes a representar nos resultados e um indicador usado regularmente por operadores de telecomunicações. São calculado por:

$$Custo/Casa Servida = \frac{-Investimento\ acumulado\ depreciado}{N^{\circ}Utilizadores}; \quad (76)$$

$$Custo/Casa Passada = \frac{-Investimento\ faseado\ acumulado\ depreciado}{N^{\circ}Utilizadores}; \quad (77)$$

5.1.3.1 Análise de sensibilidade

Apesar de cada cenário, que será apresentado nas secção seguinte, ter os seus parâmetros de entrada bem definidos, será importante tirar conclusões para além dos valores considerados. Assim, parâmetros como ρ e τ , distância média ($< L >$), serão alvo de uma análise mais exaustiva, para além dos valores de entrada de cada configuração. É importante averiguar a sensibilidade dos valores de saída, à variação destes parâmetros.

5.2 Cenários de Estudo

O esquema seguinte mostra, de forma resumida, as características particulares de cada uma das configurações que serão estudadas nas secções seguintes deste documento.

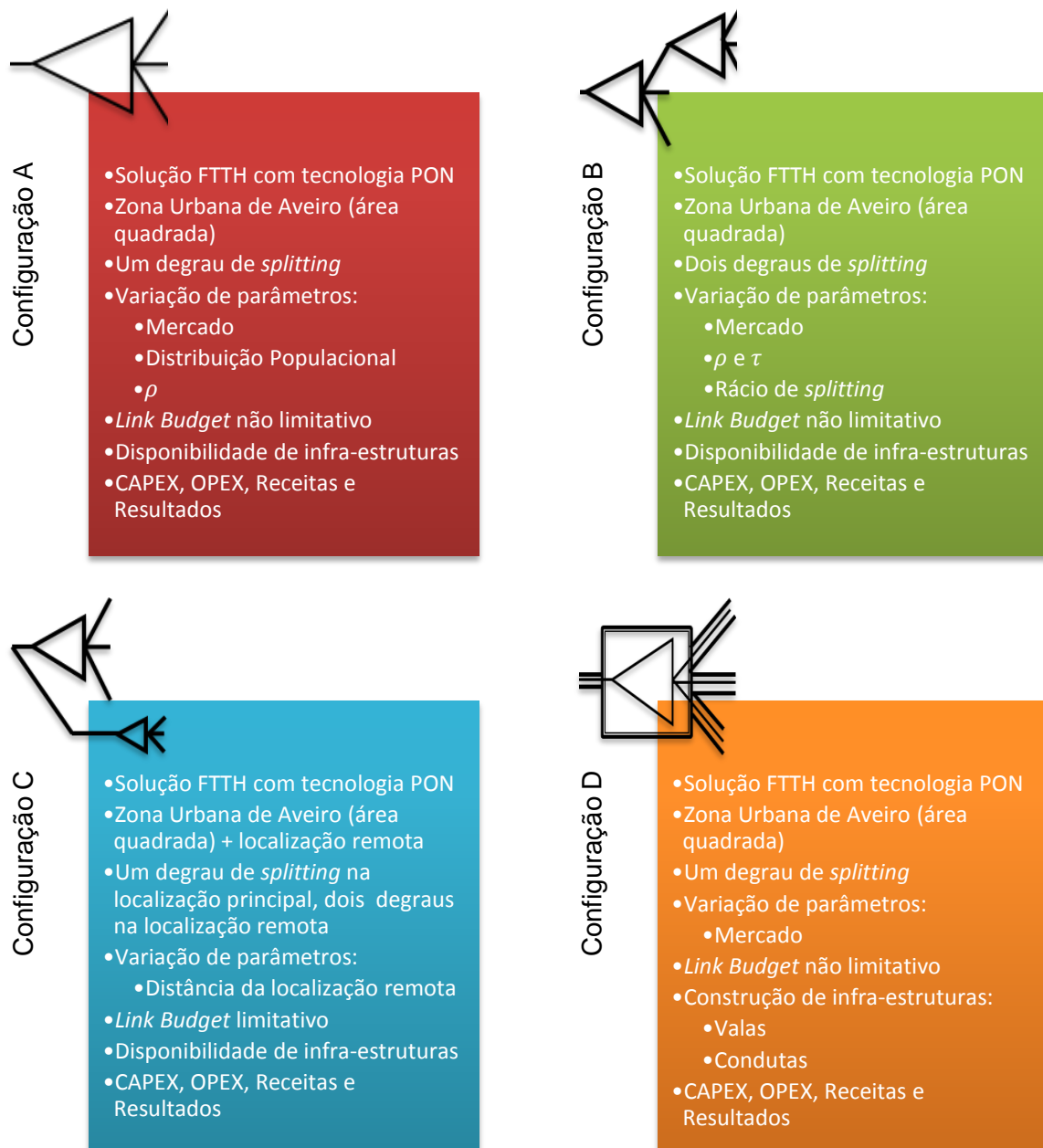


Figura 74 – Resumo das características de cada configuração.

5.3 Configuração A – Um nível de *Splitting*

A configuração A distingue-se por ser a solução apresentada que revela mais simplicidade, no entanto não é a que apresenta, necessariamente, custos mais reduzidos. Por ser a configuração que gera menos cálculos computacionais, será usada para fazer variar um dos parâmetros de foco central deste documento: distribuição populacional dentro de uma área restrita

e correspondente distância média OLT-ONU. A figura seguinte, já apresentada na **Secção 4.5**, representa este cenário de estudo.

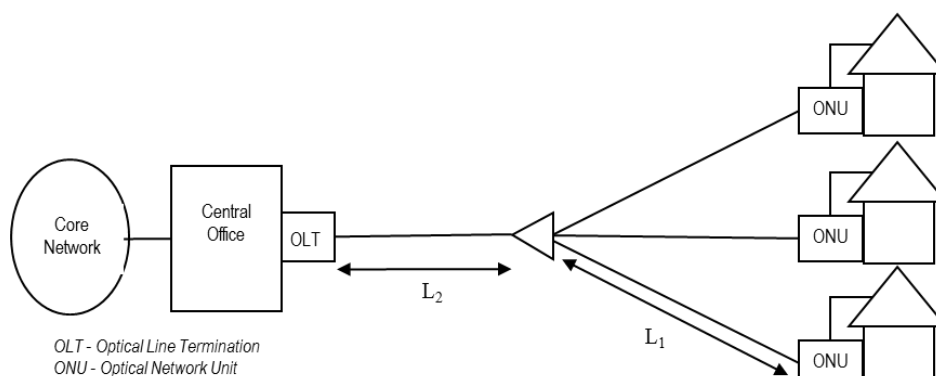


Figura 75 – Configuração com um grau de *splitting* [17].

5.3.1 Geografia e Distância Média Optimizada

A zona urbana de Aveiro foi escolhida para exemplificar esta configuração, representado na figura seguinte, e relativamente a esta zona foram recolhidos diferentes dados oficiais [10].



Figura 76 - Zona Urbana de Aveiro.

A área total da região de Aveiro é de 200 km^2 , a população total é de 73335 que habitam em 32741 unidades habitacionais, dando uma média de 2.4 pessoas por unidade habitacional. No

entanto, considerando apenas a área da **Figura 76**, as populações de cada freguesia e a metodologia *cluster* usada na **Secção 4.3** - **Figura 48**, é possível estimar que apenas aproximadamente 18000 unidades habitacionais se encontram na referida área, sendo esta 25 km^2 . A distância máxima (L_{max}), no pior caso, que um cliente poderá estar do CO, é de 7.07 km.

Seguidamente estão apresentadas as três das quatro possíveis distribuições populacionais referidas na **Secção 4.2**, tendo estas sido adaptadas, de modo a poderem representar a distribuição da população dentro da zona urbana de Aveiro. A distribuição, em que a população se encontra na sua maioria afastada do CO, não foi tida em conta no processo de obtenção de resultados, visto que a opção de instalar a estação central local afastada da população nunca seria tida em conta por um operador, pelo simples motivo que não é uma opção interessante do ponto de vista financeiro pelos elevados custos que acarreta sem qualquer benefício aparente. Considerando a localização do *central office* na **Figura 77** e os gráficos da **Figura 78**, **Figura 79** e **Figura 80**, onde estão representadas possíveis relações da distribuição populacional com a distância do CO.



Figura 77 – Representação da localização do CO e L_{max} em relação à área a cobrir.

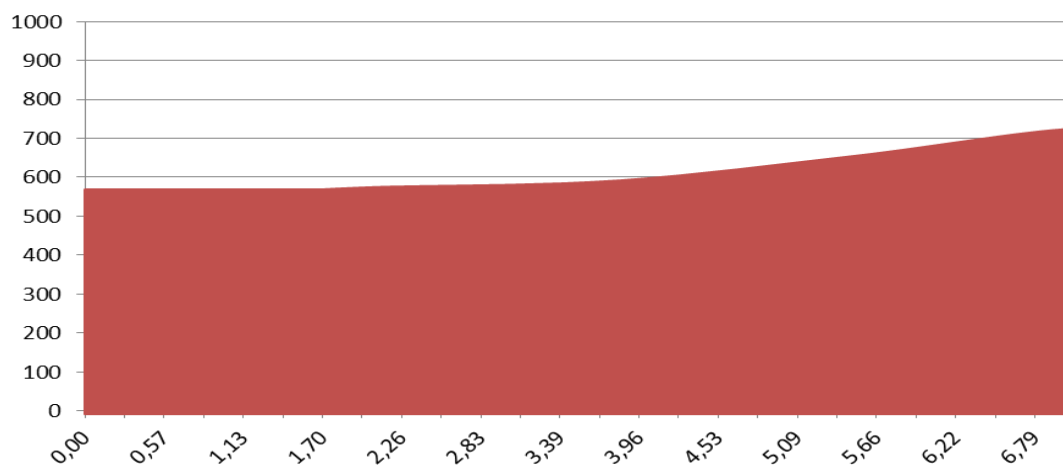


Figura 78 – Distribuição populacional uniforme.

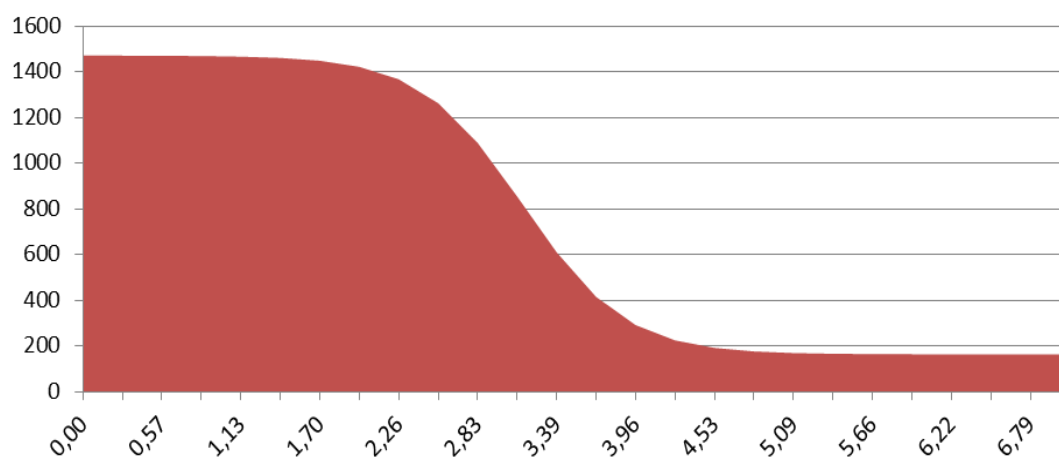


Figura 79 – População próxima do CO.

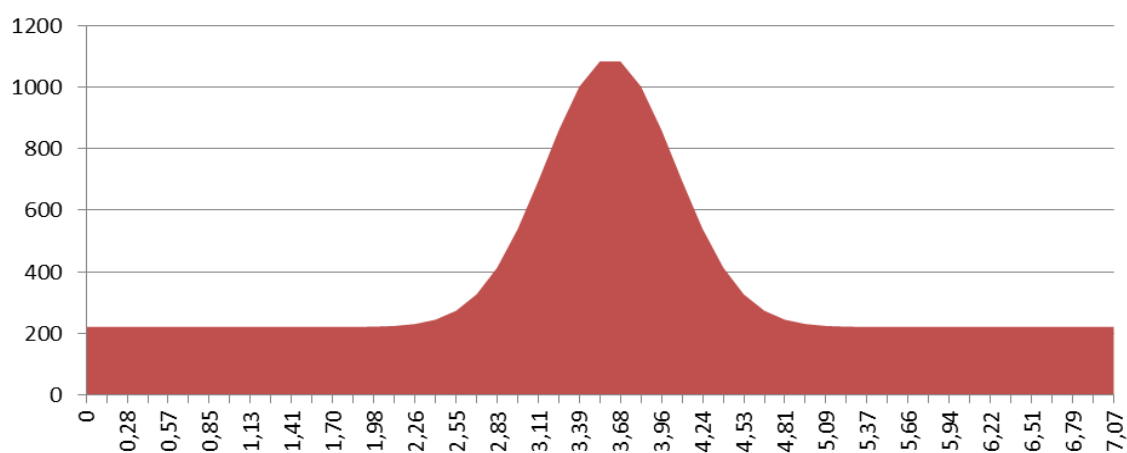


Figura 80 – Distribuição Normal da população.

Cada uma destas distribuições apresenta um $\langle L \rangle$ distinto, que no entanto terá de ser optimizado multiplicando cada $\langle L \rangle$ por k , tal como foi demonstrado na **Secção 4.3**. Estes valores são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 11 – $\langle L \rangle$ para as diferentes distribuições populacionais

	$\langle L \rangle_{linear}$ (km)	$\langle L \rangle_{real}$ (km)
População com distribuição uniforme	2,8050	3,9675
População próxima do CO	1,7405	2,4618
População com distribuição normal	3,5355	5,0007

No entanto os valores anteriores terão que ser validados pelo *link budget*. Para o caso de apenas um *splitter*, a L_{max_LB} , usando a fórmula apresentada na **Secção 4.4**, é de 76 km. As distâncias máximas usadas são assim, muito inferiores ao limite do *link budget*.

A seguinte tabela mostra o comprimento de L_1 e L_2 em função da distribuição populacional e da posição relativa do *splitter*:

Tabela 12 - L_1 e L_2 em função da distribuição populacional e da posição do *splitter*.

		L_1 (km)	L_2 (km)
$\rho = 0,8$	População com distribuição uniforme	0,79	3,17
	População próxima do CO	0,49	1,97
	População com distribuição normal	1,00	4,00
$\rho = 0,5$	População com distribuição uniforme	1,98	1,98
	População próxima do CO	1,23	1,23
	População com distribuição normal	2,50	2,50
$\rho = 0,2$	População com distribuição uniforme	3,17	0,79
	População próxima do CO	1,97	0,49
	População com distribuição normal	4,00	1,00

5.3.2 Mercado

Devido à incerteza inerente à penetração no mercado de um novo produto ou tecnologia, neste caso de uma rede FTTH, foram considerados três cenários distintos: um optimista, um mediano e, finalmente, um pessimista. Todos eles têm um nível de partida para o mercado de 10% e um nível de saturação de 70%, para um mercado com 18000 potenciais assinantes (**Tabela 13**). As suas curvas de penetração são apresentadas na **Figura 81**, e o número de clientes para cada abordagem, para um período de dez anos.

Tabela 13 – Valores utilizados no cálculo das taxas de penetração.

Optimista	Mediano	Pessimista
-----------	---------	------------

Penetração inicial	10%	10%	10%
Penetração final	70%	70%	70%
α	900	2000	5000
β	-1,5	-1,5	-1,5

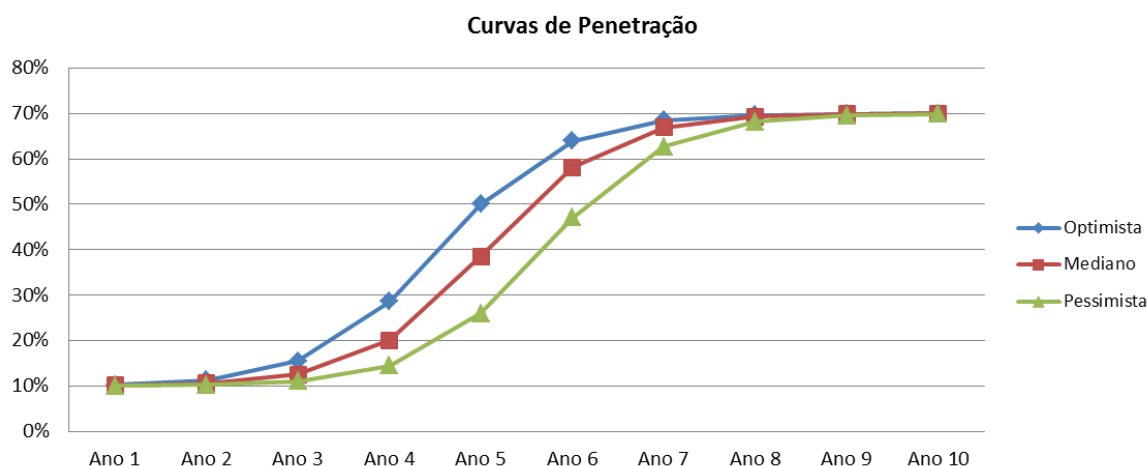


Figura 81 – Curvas de penetração de Mercado para um período de 10 anos.

Na **Tabela 14** é possível observar a evolução da percentagem de penetração de mercado, enquanto na **Tabela 15** estão representados os mesmos valores mas em número de clientes.

Tabela 14 – Evolução da taxa de penetração para cada abordagem: optimista, mediana e pessimista para os 10 anos de estudo económico.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Optimista	10%	11%	15%	29%	50%	64%	69%	70%	70%	70%
Mediano	10%	11%	13%	20%	38%	58%	67%	69%	70%	70%
Pessimista	10%	10%	11%	14%	26%	47%	63%	68%	70%	70%

Tabela 15 – Número de clientes para cada abordagem: optimista, mediana e pessimista para os 10 anos de estudo económico.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Optimista	1854	2036	2782	5143	9011	11520	12339	12541	12587	12597
Mediano	1825	1908	2266	3613	6928	10463	12037	12469	12571	12594
Pessimista	1810	1844	1991	2607	4669	8479	11293	12279	12527	12584

5.3.3 Material e Custos

Para elaborar uma análise técnico-económica rigorosa sobre a implementação de uma rede FTTH, devem ser considerados todos os detalhes dos vários segmentos de rede com todos os seus múltiplos itens, e respectivo faseamento de instalação.

Neste caso, todos esses elementos de custo serão agregados em apenas três itens:

- Item 1 - Equipamento do utilizador (ONU).
- Item 2 - Ponto de agregação / distribuição (bateria de *Splitters*) e cablagem de fibra óptica.
- Item 3 - Equipamento da Estação Local (*Central Office*).

Será também assumido que possíveis custos de instalação já estão inseridos nos custos dos vários itens. A **Tabela 16** fornece as proporções válidas da capacidade dos vários itens, necessários para implementar a nova rede.

Tabela 16 - Custo e rácios de partilha dos vários componentes.

	Custo	Rácio
Item 1	$Custo_{Item\ 1} = C_{ONU} \text{ (€)}$	1:1 (1 ONU por cada utilizador)
Item 2	$Custo_{Item\ 2} = C_S + C_F \text{ (€)}$	1:32 (1 <i>splitter</i> por cada 32 ONU)
Item 3	$Custo_{Item\ 3} = C_{OLT} \text{ (€)}$	1:128 (1 OLT por cada 128 <i>splitters</i>)

A configuração A segue os seguintes pressupostos:

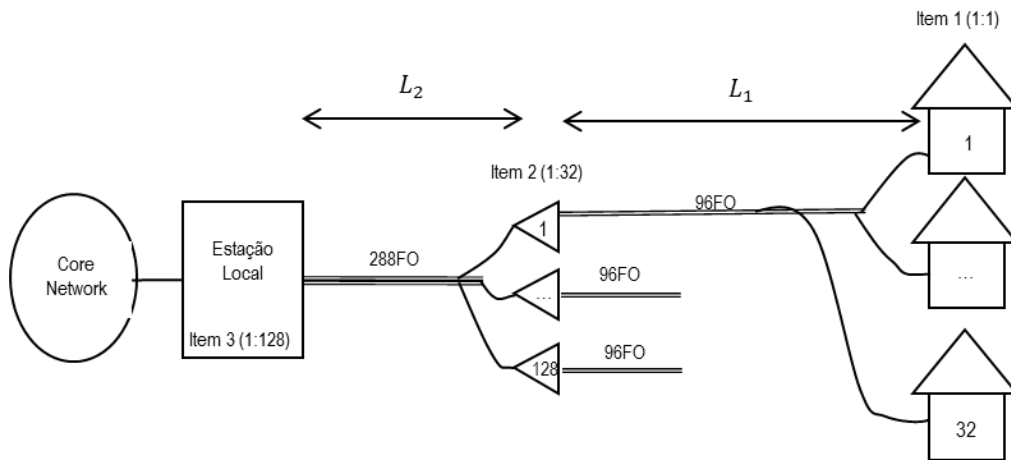


Figura 82 - Esquema da configuração A. Adaptado de [18].

- O custo do item 1 no “Momento 0” do exercício económico é de 115€. Este valor sofrerá erosão ao longo dos anos de acordo com a fórmula (60) e a **Tabela 6**. Quando necessário, o operador adquire um equipamento ONU pelo valor de mercado do corrente ano;
- O custo do Item 2 depende da distância da fibra a instalar (C_F) e do custo total dos *splitters* (C_S), ao valor actualizado de mercado. O custo da fibra poderá sofrer variações significativas consoante a localização relativa do degrau de *splitting* (ρ). Para a rede *feeder* serão usados cabos de 288 fibras ópticas e para a rede *drop*

cabos de 96FO. Estes valores poderão não fazer sentido à partida, pois cada splitter do item 2 apenas irá servir um máximo de 32 clientes, no entanto será instalado um cabo contendo 96FO, ficando um excesso de 64FO. Esta decisão é tomada pelos operadores com justificação dos elevados custos da instalação de mais fibra óptica no mesmo local e a redução dos preços do cabo de FO por km, quando considerados cabos de maior numero de fibras. Essa fibra será considerada fibra escura (*dark fiber*), estará disponível e será de fácil acesso ao operador em caso de necessidade, não aumentado significativamente os custos. A fibra escura poderá no futuro ser utilizada, caso se verifique um *upgrade* à rede, e o *splitter* suporte um rácio superior, ou caso um cabo de fibra sofra um corte e não possa ser mais utilizado. O mesmo se verifica para o caso da rede *feeder*, onde o cabo de 288FO poderá deixar fibra escura disponível para o operador utilizar em caso de necessidade;

- O custo do item 3 está directamente dependente do número de utilizadores, sabendo que cada OLT poderá servir um máximo de 4096 clientes, que está em conformidade com este cenário ($128 \times 32 = 4096$).

5.3.4 CAPEX

Para a elaboração do CAPEX, para as três abordagens de penetração de mercado, foi considerado um $\rho = 0,8$ e uma população com uma distribuição gaussiana. A escolha destes pressupostos iniciais, não teve qualquer critério inerente, pois ambos os parâmetros serão alvo de análise nas secções seguintes deste documento. Os valores de L_1 e L_2 utilizados estão representados na Tabela 12. Nas páginas seguintes são apresentadas as tabelas dos custos totais de cada item, o investimento anual necessário para cada item, o investimento anual total e o investimento acumulado depreciado para as três abordagens de mercado.

Tabela 17 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	<u>Variável</u>
ρ	0,8
Distribuição da população	Gaussiana

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 18 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}) para uma abordagem “optimista”.

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
134.020 €	146.022 €	192.029 €	358.053 €	618.092 €	776.115 €	844.126 €	856.127 €	860.128 €	860.128 €
20.880 €	22.893 €	30.082 €	51.635 €	84.475 €	104.455 €	110.348 €	111.666 €	112.076 €	112.076 €

100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Tabela 19 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para uma abordagem "optimista".

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
154.900 €	14.014 €	53.196 €	187.578 €	292.879 €	178.004 €	73.903 €	13.320 €	4.410 €	- €
100.000 €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €	- €

Tabela 20 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem "optimista".

468.110 €	34.218 €	133.133 €	531.791 €	779.087 €	419.926 €	250.009 €	31.462 €	8.398 €	921 €
468.110 €	502.328 €	635.461 €	1.167.252 €	1.946.339 €	2.366.265 €	2.616.274 €	2.647.736 €	2.656.135 €	2.657.055 €
468.110 €	455.517 €	543.099 €	1.020.579 €	1.697.609 €	1.947.774 €	2.003.006 €	1.834.167 €	1.659.149 €	1.494.154 €

Percentagem do Custo do Equipamento

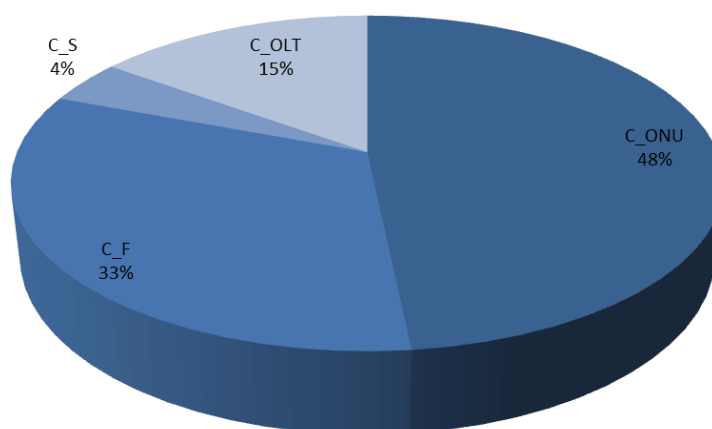


Figura 83 – Representação gráfica das percentagens do investimento de classe de equipamento em relação ao investimento total, para uma abordagem "optimista".

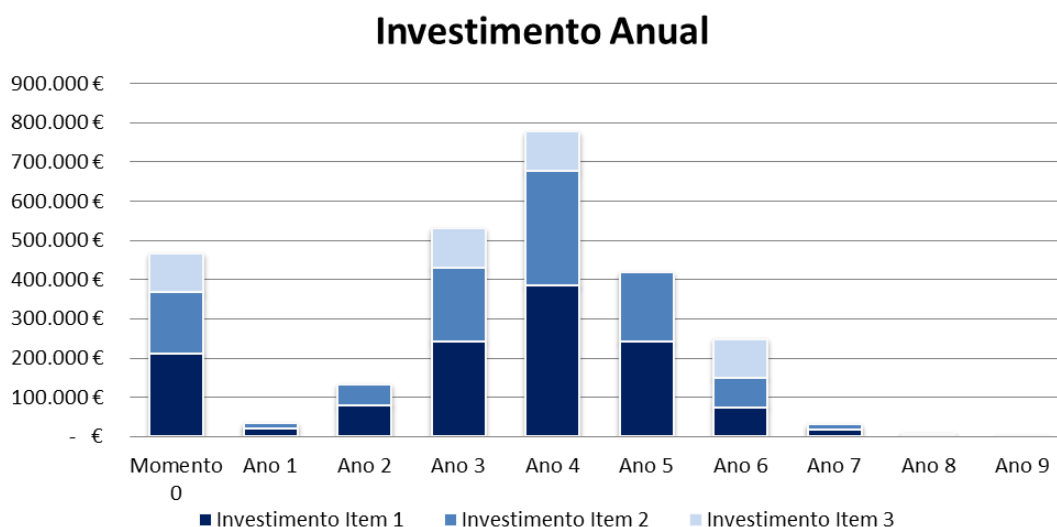


Figura 84 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “optimista”.

Tabela 21 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}), para uma abordagem “mediana”.

209.875 €	219.089 €	257.450 €	396.779 €	727.772 €	1.068.486 €	1.214.931 €	1.253.730 €	1.262.574 €	1.264.498 €
134.020 €	138.021 €	158.771 €	233.764 €	425.682 €	619.093 €	697.404 €	730.850 €	735.308 €	736.769 €
20.880 €	21.551 €	24.989 €	37.222 €	65.448 €	93.269 €	105.054 €	107.910 €	108.524 €	108.715 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €

Tabela 22 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem “mediana”.

209.875 €	9.214 €	38.361 €	139.329 €	330.993 €	340.714 €	146.445 €	38.799 €	8.843 €	1.925 €
154.900 €	4.671 €	24.188 €	87.226 €	220.144 €	221.232 €	90.095 €	36.302 €	5.072 €	1.652 €
100.000 €	- €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €

Tabela 23 – Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “mediana”.

464.775 €	13.885 €	62.550 €	226.555 €	651.138 €	661.947 €	236.540 €	175.101 €	13.916 €	3.577 €
464.775 €	478.660 €	541.210 €	767.765 €	1.418.902 €	2.080.849 €	2.317.389 €	2.492.490 €	2.506.406 €	2.509.983 €
464.775 €	432.183 €	451.514 €	632.917 €	1.220.763 €	1.760.633 €	1.821.110 €	1.814.101 €	1.646.606 €	1.485.523 €

Percentagem do Custo do Equipamento

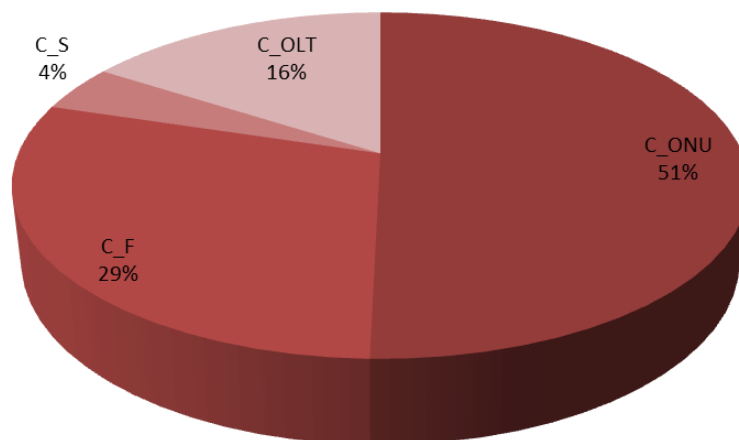


Figura 85 – Representação gráfica das percentagens dos custos totais em material, para uma abordagem “mediana”.

Investimento Anual

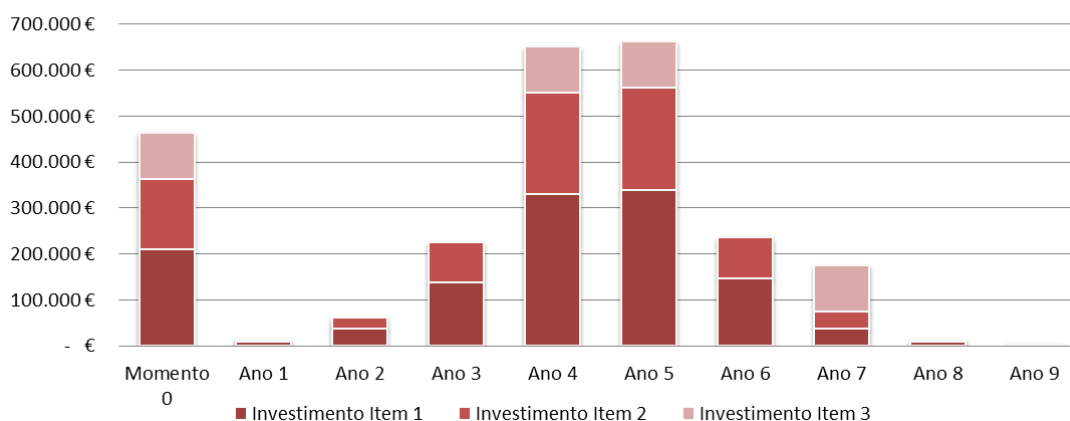


Figura 86 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “mediana”.

Tabela 24 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}), para uma abordagem “pessimista”.

208.150 €	211.873 €	227.709 €	291.358 €	497.229 €	864.509 €	1.126.337 €	1.214.814 €	1.236.348 €	1.241.121 €
132.020 €	134.020 €	143.452 €	177.377 €	301.360 €	509.399 €	647.225 €	694.354 €	719.616 €	722.538 €
20.520 €	20.855 €	22.418 €	27.952 €	45.322 €	75.420 €	96.162 €	102.971 €	104.609 €	104.991 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €

Tabela 25 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem “pessimista”.

208.150 €	3.723 €	15.836 €	63.649 €	205.871 €	367.280 €	261.828 €	88.477 €	21.534 €	4.773 €
152.540 €	2.336 €	10.995 €	39.459 €	141.352 €	238.136 €	158.568 €	53.939 €	26.900 €	3.304 €
100.000 €	0 €	0 €	0 €	100.000 €	100.000 €	0 €	0 €	100.000 €	0 €

Tabela 26 – Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “pessimista”.

460.690 €	6.059 €	26.831 €	103.109 €	447.223 €	705.416 €	420.396 €	142.415 €	148.433 €	8.078 €
460.690 €	466.749 €	493.579 €	596.688 €	1.043.911 €	1.749.328 €	2.169.724 €	2.312.139 €	2.460.573 €	2.468.650 €
460.690 €	420.680 €	405.442 €	468.007 €	868.429 €	1.487.003 €	1.758.699 €	1.725.244 €	1.701.153 €	1.539.116 €

Percentagem do Custo do Equipamento

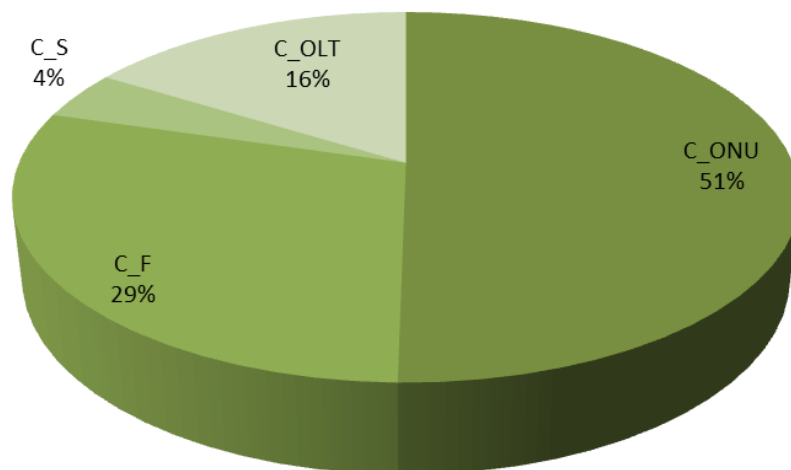


Figura 87 – Representação gráfica das percentagens dos custos totais em material, para uma abordagem “pessimista”.

Investimento Anual

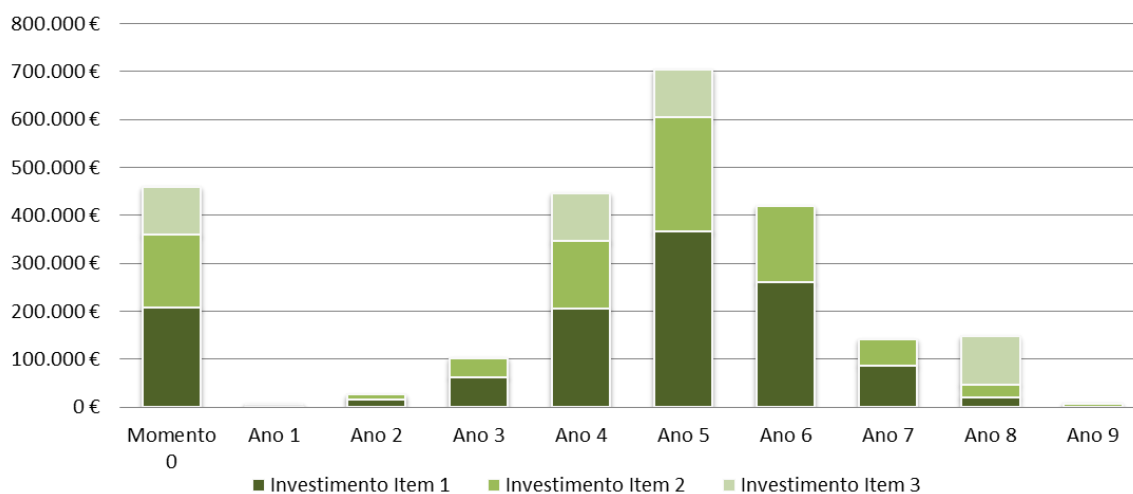


Figura 88 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “pessimista”.

De toda a informação referente a custos de investimento, é possível criar o gráfico onde se pode comprar o investimento realizado em cada ano do projecto em função das penetrações de mercado.

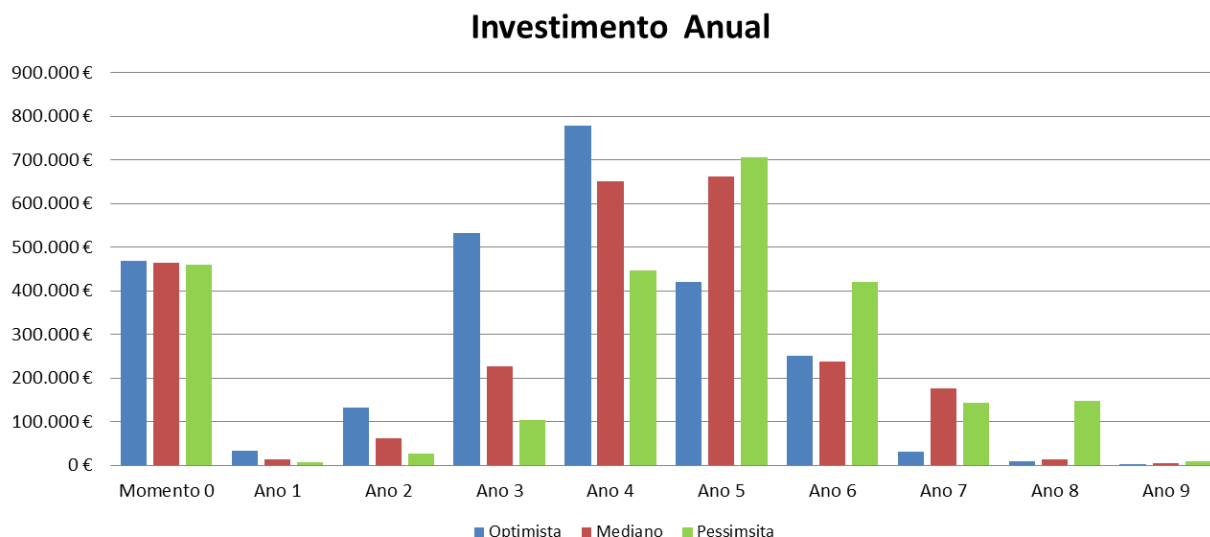


Figura 89 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.

Do gráfico da **Figura 89** conclui-se que o investimento realizado torna-se maior nos primeiros anos para uma penetração optimista, sendo superior nos últimos anos para uma abordagem pessimista.

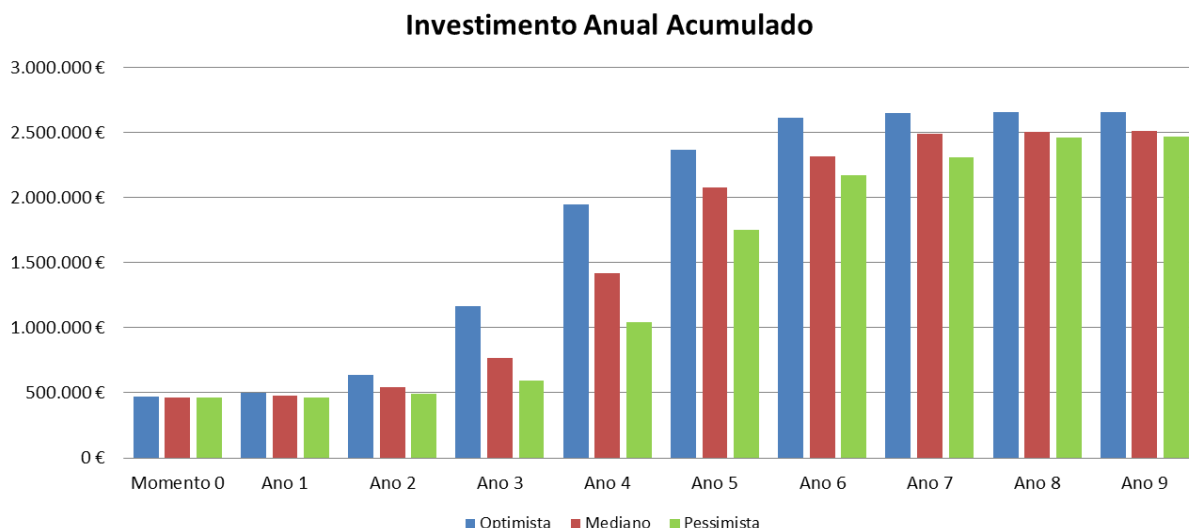


Figura 90 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.

Pelo análise gráfica da **Figura 90**, é ainda possível verificar que o investimento total diminui ligeiramente para a abordagem mediana em relação à optimista, e um pouco mais quando a

penetração considerada é a pessimista. Tal facto deve-se à erosão do preço dos equipamentos. Ou seja, quanto mais tarde for feito o investimento em equipamento, menor será o valor pago, seja fibra, *splitters* ou terminais ONU.

5.3.4.1 Parâmetro ρ

Para a realização do estudo do impacto do parâmetro ρ , será considerada a abordagem optimista de mercado e uma distribuição Gaussiana da população. Todos os outros pressupostos da análise anterior manter-se-ão, e serão agora considerados os valores para $\rho = 0,5$ e $\rho = 0,2$. Os resultados dos mesmos comparar-se-ão ainda com os resultados de $\rho = 0,8$, cuja topologia já foi analisada anteriormente.

Tabela 27 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Optimista
ρ	<u>Variável</u>
Distribuição da população	Gaussiana

As novas distâncias L_1 e L_2 estão representadas na Tabela 28.

Tabela 28 – Influência do parâmetro ρ nos comprimentos L_1 e L_2 .

	L_1 (km)	L_2 (km)
$\rho = 0,8$	1,00	4,00
$\rho = 0,5$	2,50	2,50
$\rho = 0,2$	4,00	1,00

Sabendo que o único custo, que sofrerá alteração, é a fibra necessária, os resultados relativos à alteração do parâmetro ρ sobre o investimento necessário em cablagem, são expressos nas tabelas seguintes.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 29 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,8$.

134.020 €	146.022 €	192.029 €	358.053 €	618.092 €	776.115 €	844.126 €	856.127 €	860.128 €	860.128 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Tabela 30 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,5$.

301.295 €	329.591 €	432.260 €	756.016 €	1.256.812 €	1.566.138 €	1.669.708 €	1.691.998 €	1.699.304 €	1.699.304 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 31 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,2$.

468.570 €	513.843 €	678.114 €	1.184.659 €	1.974.963 €	2.469.884 €	2.625.333 €	2.660.997 €	2.672.688 €	2.672.688 €
-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------



Figura 91 – Investimento acumulado em fibra (C_f), ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para $\rho = 0,8$ (caso “optimista”), $\rho = 0,5$ e $\rho = 0,2$.

Através da análise da **Figura 91**, é possível constatar que, com o aumento do parâmetro ρ (aumento do comprimento L_2 e posterior diminuição do comprimento L_1), os custos de investimento diminuem. Tal facto deve-se à quantidade de fibra que é partilhada pelos diversos clientes. A cablagem anterior ao ponto de flexibilidade é também partilhada pelo número de utilizadores igual ao rácio de *splitting*, enquanto a cablagem usada posterior a esse ponto é dedicada (1FO por cliente).

Se for comparado o caso $\rho = 0,8$ e $\rho = 0,2$ o aumento no custo total da fibra óptica poderá atingir valores acima dos 300%, bastante mais significativo que o investimento em fibra óptica, representando cerca de 30% do total do investimento.

5.3.4.2 Distribuição Populacional

Uma outra variável de análise prende-se com a distribuição da população pelo território. Nesta secção, apresentar-se-ão os valores de CAPEX, para que seja possível efectuar o comparativo dos três tipos de distribuição, apresentados anteriormente (secção 5.3.1). Será utilizada uma abordagem de mercado optimista e $\rho = 0,8$.

Tabela 32 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Optimista
ρ	0,8
Distribuição da população	<u>Variável</u>

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 33 - Investimento acumulado em fibra (C_f), para uma população distribuída de forma Gaussiana.

134.020 €	146.022 €	192.029 €	358.053 €	618.092 €	776.115 €	844.126 €	856.127 €	860.128 €	860.128 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Tabela 34 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para uma população distribuída uniformemente.

106.328 €	115.850 €	152.350 €	284.070 €	490.378 €	615.750 €	669.707 €	679.229 €	682.403 €	682.403 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Tabela 35 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para uma população na sua maioria próxima do CO.

65.977 €	71.885 €	94.534 €	176.267 €	304.282 €	382.076 €	415.557 €	421.465 €	423.435 €	423.435 €
----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Os resultados dos custos da variação da distribuição populacional pela área de estudo estão representados na **Figura 92**. Novamente, comparando o melhor com o pior caso (Próximo do CO e Gaussiano, respectivamente), os aumentos poderão atingir valores acima dos 200%.

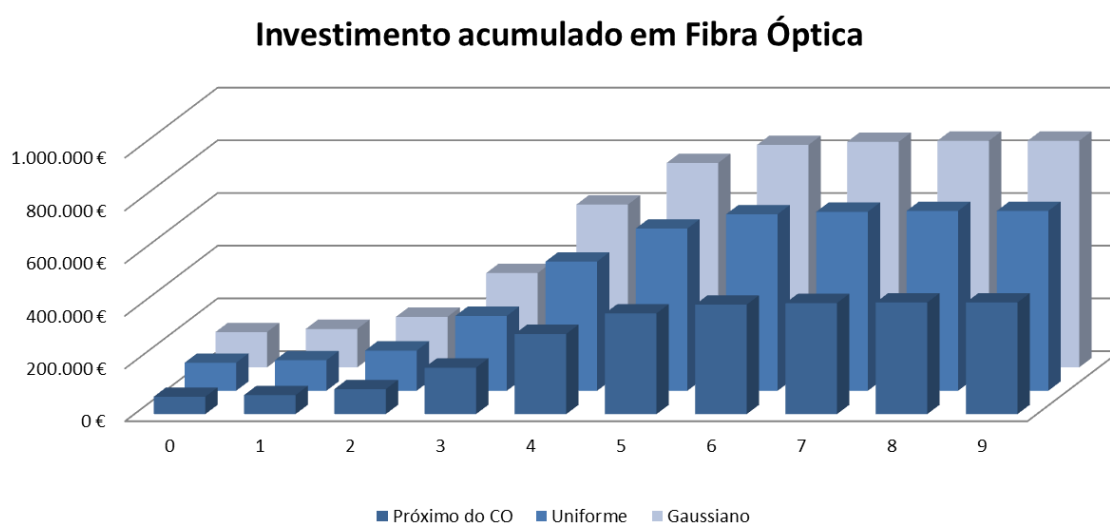


Figura 92 – Investimento acumulado em fibra óptica ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para os 3 tipos de distribuição populacional analisados.

5.3.4.3 Investimento Faseado

Partindo do princípio que se conhecem os valores do CAPEX para o caso de um investimento contínuo, seguindo o ritmo de adesão ao serviço, pode-se agora apresentar valores do CAPEX para o caso mais realista e próximo da política de investimento dos operadores, de investimento faseado. Serão estes valores que entrarão no apuramento de resultados. Torna-se importante salientar que o valor de investimento faseado contém o custo por intervenção já adicionado, enquanto o valor do investimento descrito na **Secção 5.3.4**, não engloba esse valor. Tal deve-se ao facto de o número de intervenções ser facilmente contabilizável nesta situação, enquanto anteriormente teria que ser realizado uma intervenção por cada novo cliente que surgisse.

Tabela 36 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	<u>Variável</u>
ρ	0,8
Distribuição da população	Gaussiana

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 37 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “optimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.

10%	11%	15%	29%	50%	64%	69%	70%	70%	70%
20%	20%	30%	30%	60%	75%	75%	75%	75%	75%
10%	9%	15%	1%	10%	11%	6%	5%	5%	5%

Tabela 38- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “optimista”.

522.328 €	- €	684.924 €	- €	799.087 €	867.198 €	- €	- €	- €	- €
522.328 €	522.328 €	1.207.252 €	1.207.252 €	2.006.339 €	2.873.537 €	2.873.537 €	2.873.537 €	2.873.537 €	2.873.537 €
522.328 €	470.095 €	1.108.010 €	997.209 €	1.696.575 €	2.394.116 €	2.154.704 €	1.939.234 €	1.745.310 €	1.570.779 €

O gráfico seguinte mostra a política de investimento faseado do operador. São visíveis os pontos de intervenção nesta situação, em que no “Momento 0” é feito um investimento, de modo a poder servir 20% do mercado (mais 10% do mercado que irá efectivamente aderir ao serviço) e nos anos 2, 4 e 5 são feitos investimentos de modo a expandir a capacidade da rede.

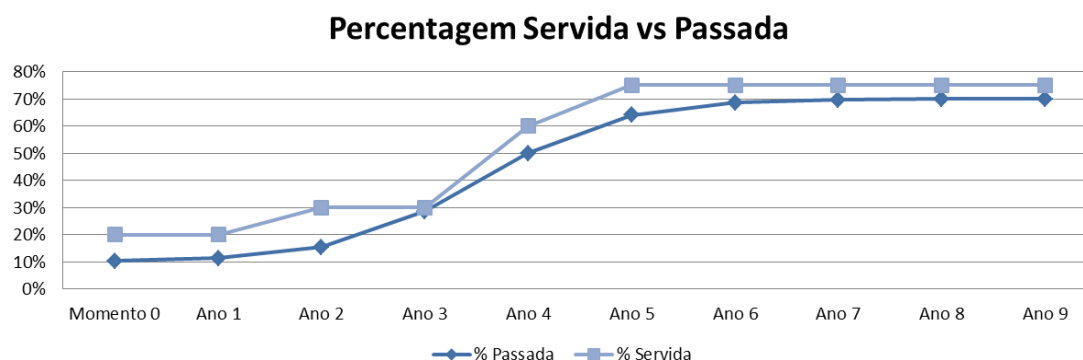


Figura 93 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado.

Analisando a **Tabela 37** e **Figura 93**, é de destacar a baixa margem que existe entre a percentagem de mercado servido e passado no ano 3. Este facto deve-se a diversos factores, entre os quais o forte crescimento da adesão ao serviço nesse ano e a incapacidade do operador

em manter a margem de 5% analisando o mercado apenas em períodos de tempo tão distantes como os considerados neste exercício económico (anualmente). Se ao invés de considerar o ano como período de tempo, fosse analisada a adesão ao serviço a um ritmo mais elevado, como por exemplo ao mês, a margem de segurança manter-se-ia seguramente bastante mais próxima dos 5%.

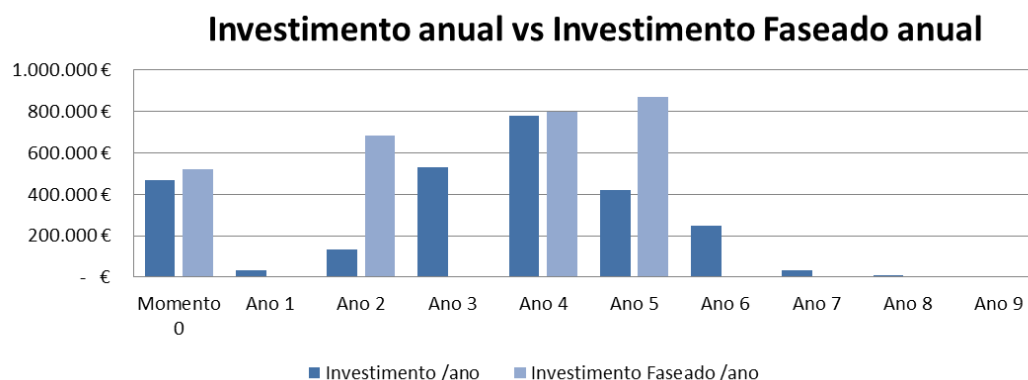


Figura 94 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “optimista”.

O gráfico da figura anterior mostra a comparação entre o investimento anual realizado a um ritmo contínuo e o investimento faseado realizado em pontos bem concretos do projecto (Momento 0, anos 2, 4 e 5). Nesses períodos, o investimento realizado é superior, comparando com o caso do investimento ser feito a um ritmo contínuo ao longo dos anos, mas tal será compensado com o valor que será poupado na diminuição do número de intervenções.

Seguidamente são apresentadas as tabelas e gráficos com os mesmos dados, mas referentes às restantes penetrações de mercado.

Tabela 39 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “mediana”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.

10%	11%	13%	20%	38%	58%	67%	69%	70%	70%
20%	20%	20%	30%	45%	60%	75%	75%	75%	75%
10%	9%	7%	10%	7%	2%	8%	6%	5%	5%

Tabela 40- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “mediana”.

561.210 €	- €	- €	246.555 €	671.138 €	681.947 €	570.377 €	- €	- €	- €
561.210 €	561.210 €	561.210 €	807.765 €	1.478.902 €	2.160.849 €	2.731.226 €	2.731.226 €	2.731.226 €	2.731.226 €
561.210 €	505.089 €	454.580 €	655.677 €	1.261.247 €	1.817.068 €	2.205.739 €	1.985.165 €	1.786.648 €	1.607.984 €

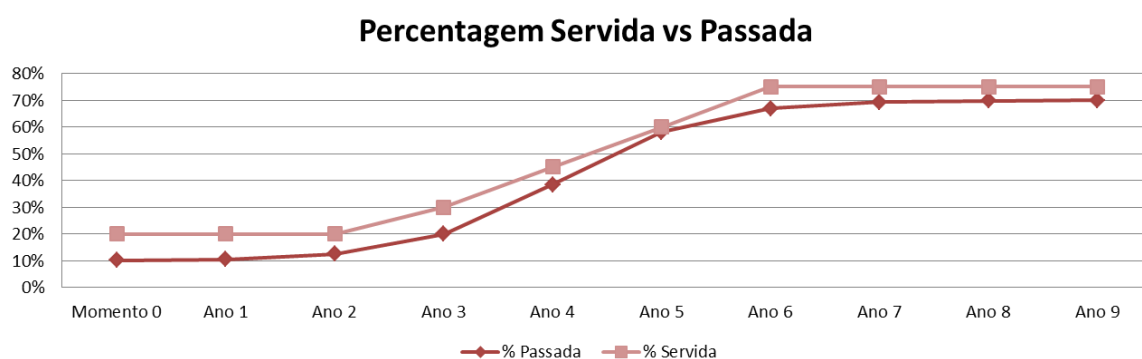


Figura 95 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado, para uma abordagem “mediana”.

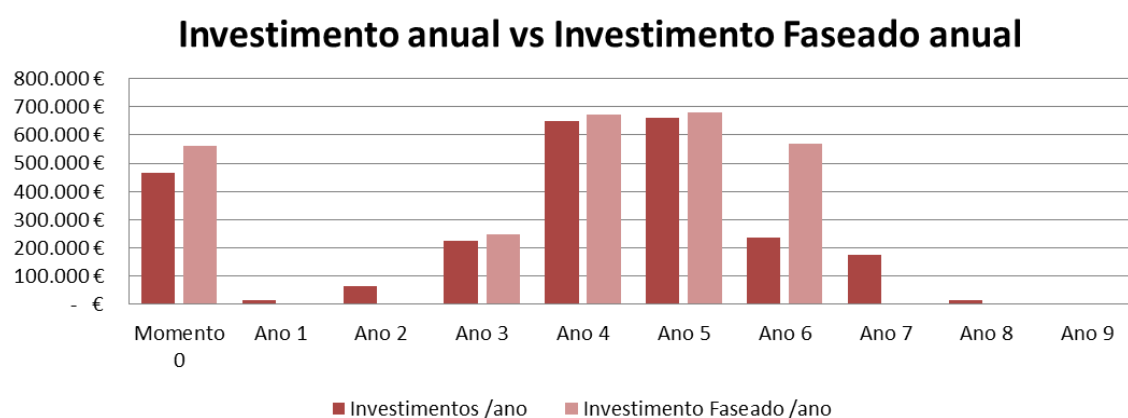


Figura 96 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “mediana”.

Tabela 41 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “pessimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.

10%	10%	11%	14%	26%	47%	63%	68%	70%	70%
20%	20%	20%	20%	30%	60%	75%	75%	75%	75%
10%	10%	9%	6%	4%	13%	12%	7%	5%	5%

Tabela 42- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “pessimista”.

616.688 €	- €	- €	- €	467.223 €	725.416 €	861.444 €	- €	- €	- €
616.688 €	616.688 €	616.688 €	616.688 €	1.083.911 €	1.809.328 €	2.670.772 €	2.670.772 €	2.670.772 €	2.670.772 €
616.688 €	555.019 €	499.517 €	449.566 €	871.832 €	1.510.065 €	2.220.503 €	1.998.453 €	1.798.607 €	1.618.747 €

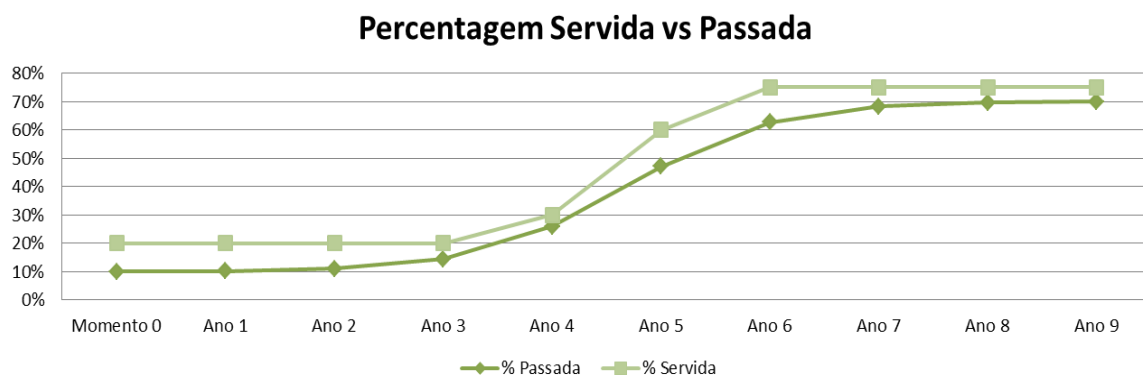


Figura 97 - Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado, para uma abordagem “pessimista”.

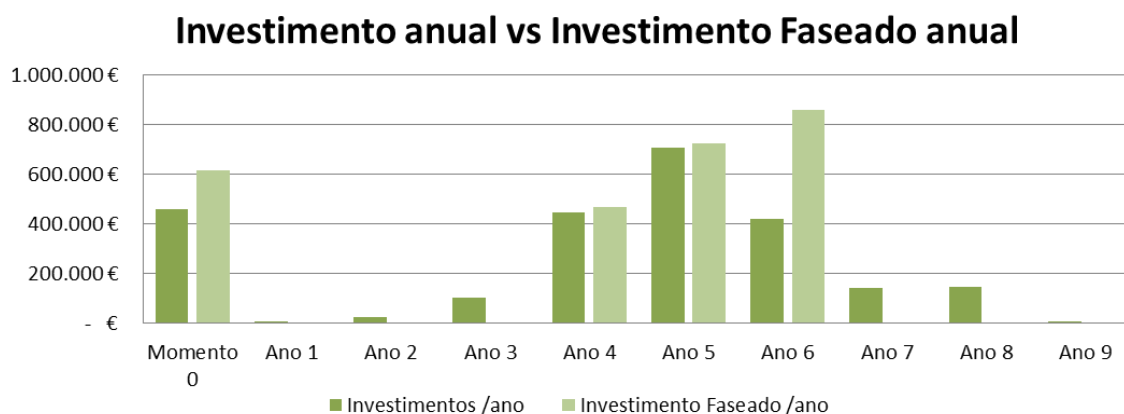


Figura 98 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “pessimista”.

Também para estas abordagens de mercado, é visível que no período de maior adesão do mercado ao serviço, a margem de segurança diminui para valores abaixo dos 5%. É possível concluir que os anos de investimento para as diferentes penetrações de mercado, os períodos de intervenção são distintos da abordagem optimista.

5.3.5 OPEX

Nesta secção são apresentados os valores dos custos operacionais para a configuração A.

De salientar que o cálculo do OPEX é dependente directamente dos valores de CAPEX e da penetração de mercado. Por sua vez os valores de CAPEX estão dependentes de ρ e da distribuição populacional.

Para efectuar o referido cálculo, usa-se a fórmula (65), onde o OPEX é calculado como soma da percentagem de $CAPEX_{Acumulado}$ com um custo fixo por utilizador. Assim quanto mais rápida for a penetração do mercado (e consequentemente maior investimento), maiores serão os custos operacionais.

Tabela 43 - Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	<u>Variável</u>
ρ	-
Distribuição da população	-

A **Tabela 44**, **Tabela 45** e **Tabela 46** mostram o custo do OPEX anual, para as três situações de penetração de mercado, e o gráfico da **Figura 99** faz o comparativo do OPEX das referidas situações.

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 44 – OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “optimista”.

287.968 €	309.838 €	399.385 €	815.763 €	1.279.917 €	1.625.071 €	1.768.012 €	1.792.227 €	1.797.757 €	1.798.997 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 45 – Número de clientes e OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “mediana”.

275.019 €	285.007 €	327.940 €	514.317 €	979.226 €	1.471.530 €	1.717.474 €	1.769.390 €	1.781.579 €	1.784.330 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 46 – Número de clientes e OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado “pessimista”.

278.829 €	282.854 €	300.589 €	374.430 €	668.576 €	1.198.393 €	1.622.235 €	1.740.449 €	1.770.254 €	1.777.098 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

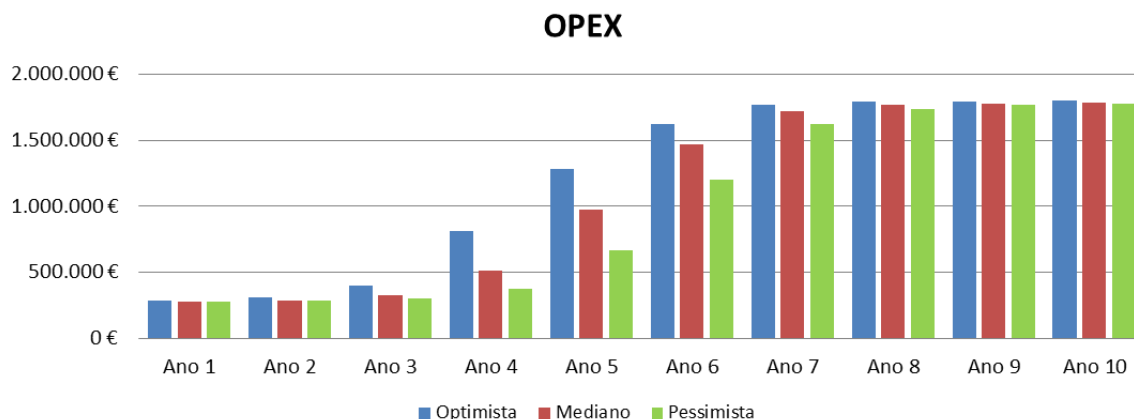


Figura 99 – OPEX anual para as 3 abordagens de mercado, ao longo dos 10 anos do estudo económico.

No caso dos custos operacionais, o parâmetro dependente do número de clientes neste exercício económico, é natural que o valor anual de OPEX para a penetração optimista seja superior.

5.3.6 Receitas

Os rendimentos do projecto de investimento provêm do pagamento de um valor, seja mensal ou anual, por parte do cliente por beneficiarem de um serviço. Nesta situação apenas existe um serviço à escolha e tem um custo anual de 550€. Essa anuidade sofrerá uma desvalorização ao longo do período de estudo. Casos como este, em que o operador apenas fornece um serviço, são bastante raros (principalmente para redes FTTH). No entanto, este pressuposto facilitará o cálculo computacional mantendo os objectivos pretendidos para esta avaliação económica.

De referir que o cálculo das receitas é independente de parâmetros como ρ ou a distribuição populacional.

Tabela 47 - Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	<u>Variável</u>
ρ	-
Distribuição da população	-

A **Tabela 48**, **Tabela 49** e **Tabela 50** mostram o número de utilizadores e o volume anual de receitas, para as três situações de penetração de mercado.

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 48 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado optimista.

550 €	523 €	496 €	472 €	448 €	426 €	404 €	384 €	365 €	347 €
1.019.433 €	1.063.687 €	1.380.909 €	2.425.094 €	4.036.595 €	4.902.833 €	4.988.591 €	4.816.665 €	4.592.647 €	4.366.598 €

Tabela 49 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado mediana.

550 €	523 €	496 €	472 €	448 €	426 €	404 €	384 €	365 €	347 €
1.003.281 €	996.608 €	1.124.367 €	1.703.657 €	3.103.502 €	4.452.429 €	4.866.266 €	4.789.122 €	4.586.728 €	4.365.339 €

Tabela 50 – Número de clientes, custo anual e receitas ao longo dos 10 anos do estudo económico, para uma penetração de mercado pessimista.

550 €	523 €	496 €	472 €	448 €	426 €	404 €	384 €	365 €	347 €
995.319 €	963.078 €	988.282 €	1.229.039 €	2.091.255 €	3.608.418 €	4.565.760 €	4.715.841 €	4.570.675 €	4.361.911 €

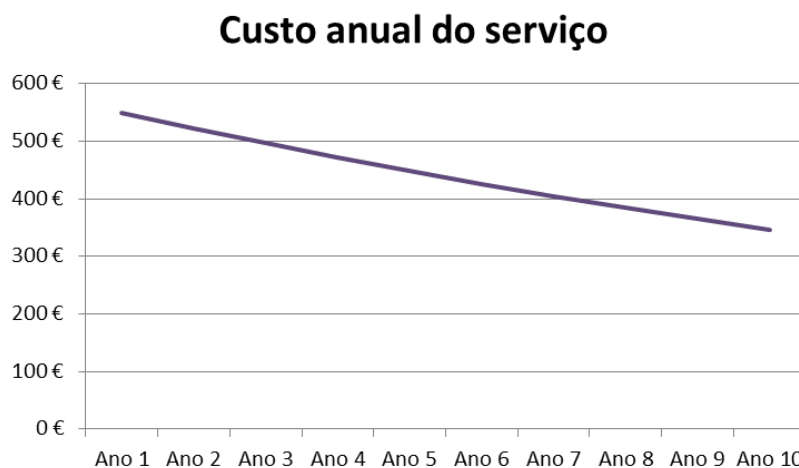


Figura 100 – Custo anual do serviço com erosão, para todas a penetrações de mercado.

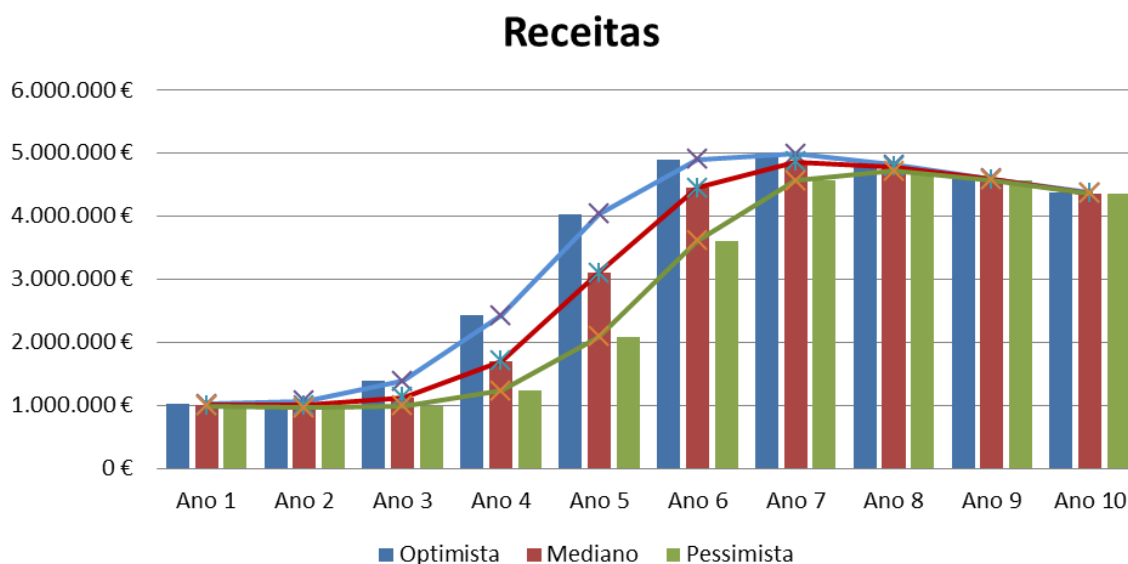


Figura 101 – Receitas para as três curvas de penetração de mercado, para os 10 anos de estudo económico.

No caso das receitas, o parâmetro dependente do número de clientes, é natural que o valor anual para a penetração optimista seja superior, tal como se pode ver na **Figura 101**.

5.3.7 Resultados

Recorrendo às ferramentas do Microsoft Excel e às equações da **Secção 5.1.3.4**, foi possível calcular facilmente os resultados deste exercício económico: fluxo líquido anual, balanço, VAL, TIR, tempo de recuperação do investimento e custo por casa passada / servida.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 51 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “optimista”.

-522.328 €	0 €	-684.924 €	0 €	-799.087 €	-867.198 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-522.328 €	-522.328 €	-1.207.252 €	-1.207.252 €	-2.006.339 €	-2.873.537 €	-2.873.537 €	-2.873.537 €	-2.873.537 €	-2.873.537 €	-2.873.537 €
0 €	-274.654 €	-296.525 €	-454.564 €	-737.855 €	-1.281.917 €	-1.669.798 €	-1.768.012 €	-1.792.227 €	-1.797.757 €	-1.798.997 €
0 €	1.019.433 €	1.063.687 €	1.380.909 €	2.425.094 €	4.036.595 €	4.902.833 €	4.988.591 €	4.816.665 €	4.592.647 €	4.366.598 €
0 €	744.778 €	767.163 €	926.346 €	1.687.239 €	2.754.679 €	3.233.035 €	3.220.579 €	3.024.439 €	2.794.891 €	2.567.601 €
0 €	744.778 €	1.511.941 €	2.438.286 €	4.125.525 €	6.880.204 €	10.113.239 €	13.333.818 €	16.358.257 €	19.153.148 €	21.720.749 €
-522.328 €	222.450 €	304.689 €	1.231.034 €	2.119.186 €	4.006.667 €	7.239.702 €	10.460.281 €	13.484.720 €	16.279.610 €	18.847.211 €

Tabela 52 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “optimista”.

VAL	47.561.829 €
TIR	127,84%
Tempo de Recuperação	5

Tabela 53 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “optimista”.

252 €	224 €	195 €	198 €	188 €	169 €	162 €	146 €	132 €	119 €
282 €	231 €	398 €	194 €	188 €	208 €	175 €	155 €	139 €	125 €

Custo por Casa Servida e Passada

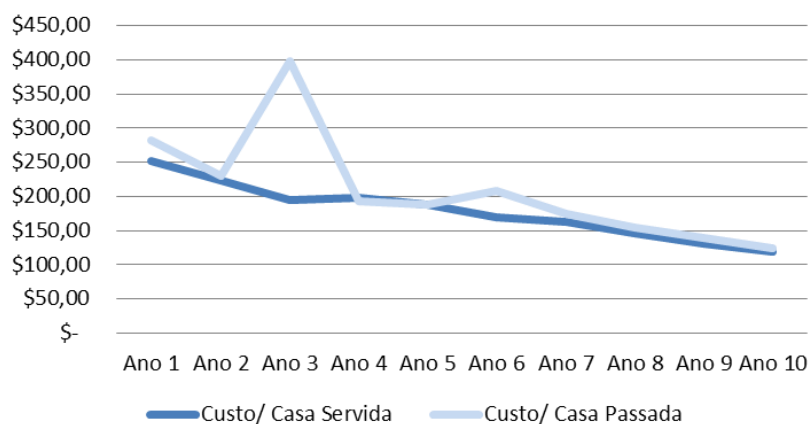


Figura 102 – Custo por casa servida e passada para uma penetração optimista.

Resultados

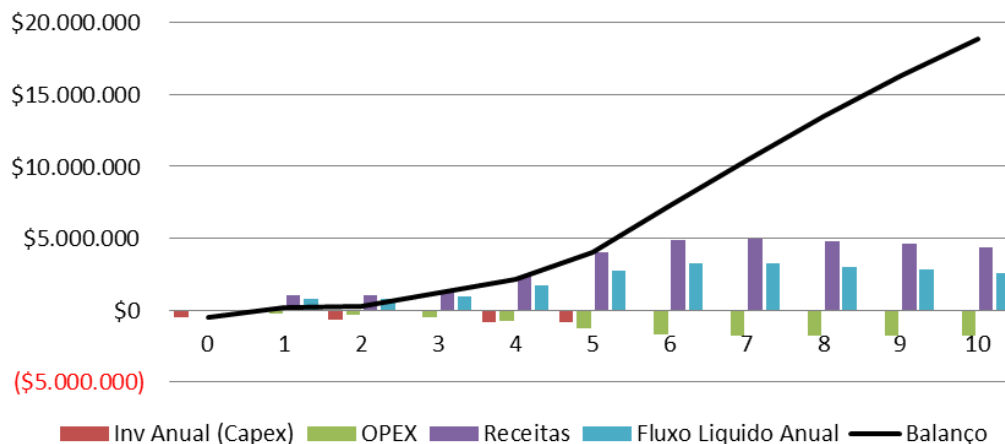


Figura 103 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem “optimista”.

Dos valores apresentados anteriormente ressaltam à vista os indicadores económicos bastante positivos, com *payback* baixo e um VAL e TIR bastante elevados. O custo por casa servida apresenta naturalmente um pico no Ano 3, resultante do forte investimento realizado nesse ano. O balanço apresenta-se positivo a partir do Ano 1, sendo que a partir do Ano 4 entra em crescimento acentuado.

Veja-se agora os resultados para as restantes penetrações de mercado.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 54 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “mediana”.

-561.210 €	0 €	0 €	-246.555 €	-671.138 €	-681.947 €	-570.377 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-561.210 €	-561.210 €	-561.210 €	-807.765 €	-1.478.902 €	-2.160.849 €	-2.731.226 €	-2.731.226 €	-2.731.226 €	-2.731.226 €	-2.731.226 €
0 €	-275.019 €	-285.007 €	-327.940 €	-514.317 €	-979.226 €	-1.471.530 €	-1.717.474 €	-1.769.390 €	-1.781.579 €	-1.784.330 €
0 €	1.003.281 €	996.608 €	1.124.367 €	1.703.657 €	3.103.502 €	4.452.429 €	4.866.266 €	4.789.122 €	4.586.728 €	4.365.339 €
0 €	728.262 €	711.601 €	796.427 €	1.189.340 €	2.124.277 €	2.980.900 €	3.148.792 €	3.019.732 €	2.805.149 €	2.581.009 €
0 €	728.262 €	1.439.863 €	2.236.290 €	3.425.630 €	5.549.907 €	8.530.807 €	11.679.600 €	14.699.332 €	17.504.481 €	20.085.490 €
-561.210 €	167.052 €	878.653 €	1.428.526 €	1.946.728 €	3.389.058 €	5.799.581 €	8.948.374 €	11.968.106 €	14.773.255 €	17.354.264 €

Tabela 55 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “mediana”.

VAL	42.714.770 €
TIR	131,23%
Tempo de Recuperação	5

Tabela 56 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “mediana”.

255 €	227 €	199 €	175 €	176 €	168 €	151 €	145 €	131 €	118 €
308 €	265 €	201 €	181 €	182 €	174 €	183 €	159 €	142 €	128 €

Custo por Casa Servida e Passada

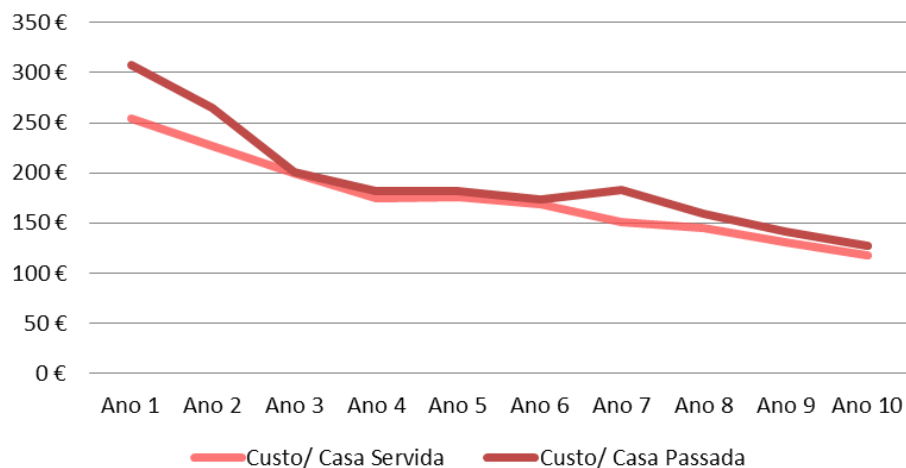


Figura 104 – Custo por casa servida e passada para uma penetração mediana.

Resultados

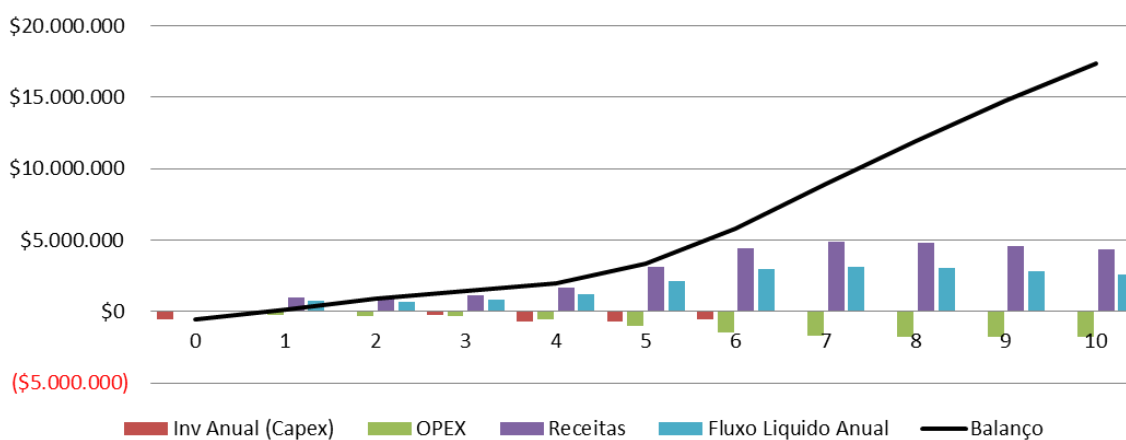


Figura 105 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem mediana.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 57 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “pessimista”.

-616.688 €	0 €	0 €	0 €	-467.223 €	-725.416 €	-861.444 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-616.688 €	-616.688 €	-616.688 €	-616.688 €	-1.083.911 €	-1.809.328 €	-2.670.772 €	-2.670.772 €	-2.670.772 €	-2.670.772 €	-2.670.772 €
0 €	-278.829 €	-282.854 €	-300.589 €	-374.430 €	-668.576 €	-1.198.393 €	-1.622.235 €	-1.740.449 €	-1.770.254 €	-1.777.098 €
0 €	995.319 €	963.078 €	988.282 €	1.229.039 €	2.091.255 €	3.608.418 €	4.565.760 €	4.715.841 €	4.570.675 €	4.361.911 €

0 €	716.490 €	680.224 €	687.693 €	854.608 €	1.422.679 €	2.410.025 €	2.943.524 €	2.975.392 €	2.800.421 €	2.584.813 €
0 €	716.490 €	1.396.714 €	2.084.407 €	2.939.015 €	4.361.695 €	6.771.719 €	9.715.244 €	12.690.635 €	15.491.056 €	18.075.870 €
-616.688 €	99.802 €	780.026 €	1.467.719 €	1.855.104 €	2.552.367 €	4.100.948 €	7.044.472 €	10.019.864 €	12.820.285 €	15.405.098 €

Tabela 58 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “pessimista”.

VAL	35.761.573 €
TIR	115,52%
Tempo de Recuperação	5

Tabela 59 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “pessimista”.

255 €	228 €	204 €	180 €	186 €	175 €	156 €	141 €	136 €	122 €
341 €	301 €	251 €	172 €	187 €	178 €	197 €	163 €	144 €	129 €

Custo por Casa Servida e Passada

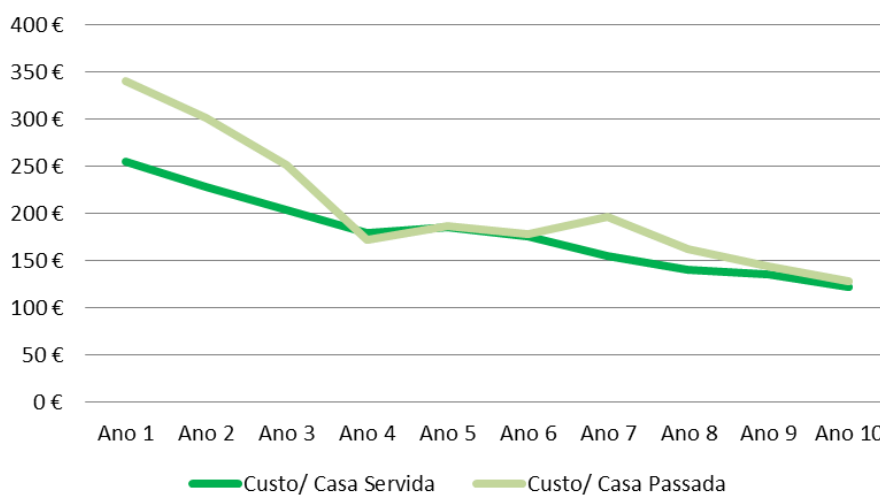


Figura 106 – Custo por casa servida e passada para uma abordagem de mercado pessimista.

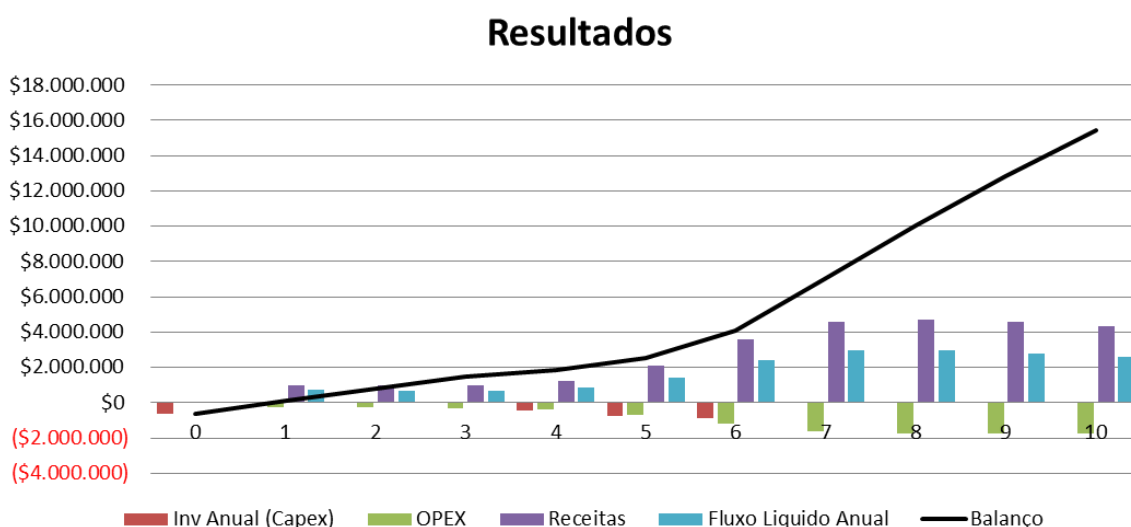


Figura 107 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem pessimista.

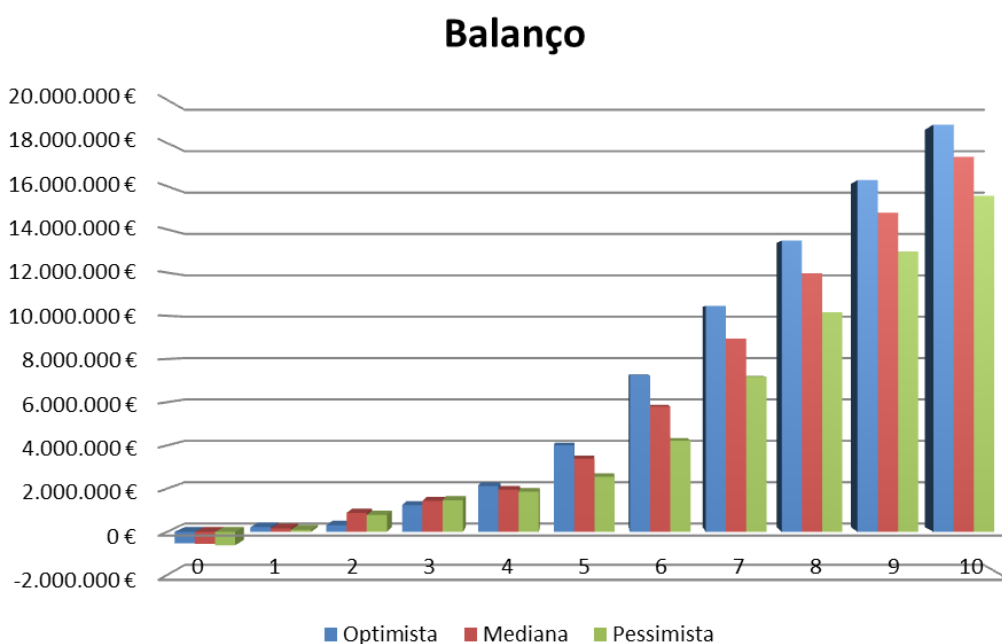


Figura 108 – Balanço final das três penetrações de mercado, para os 10 anos em avaliação.

Tal como seria de esperar, a penetração optimista salienta-se entre as restantes pelos melhores resultados obtidos. Apesar do ligeiro aumento do investimento em relação as penetrações mediana e pessimista, devido ao custo superior do material nos primeiros anos do projecto, e do superior valor de OPEX, o balanço final apresenta-se claramente superior. Isto deve-se, como era expectável, ao mais rápido crescimento do número de clientes em relação a outras penetrações, gerando maiores receitas. Nesta tipologia, todos os cenários apresentam uma Taxa Interna de Rentabilidade e Valor Actual Líquido bastante elevado, tornando o projecto bastante atractivo. Ressalta também à vista o período de recuperação igual para a todas as penetrações. Se fossem usados intervalos de tempo mais curtos (como meses ou semanas), este

valor seria favorável à penetração optimista, no entanto, a relativamente pequena diferença entre as três não permitiu uma variação do *payback*.

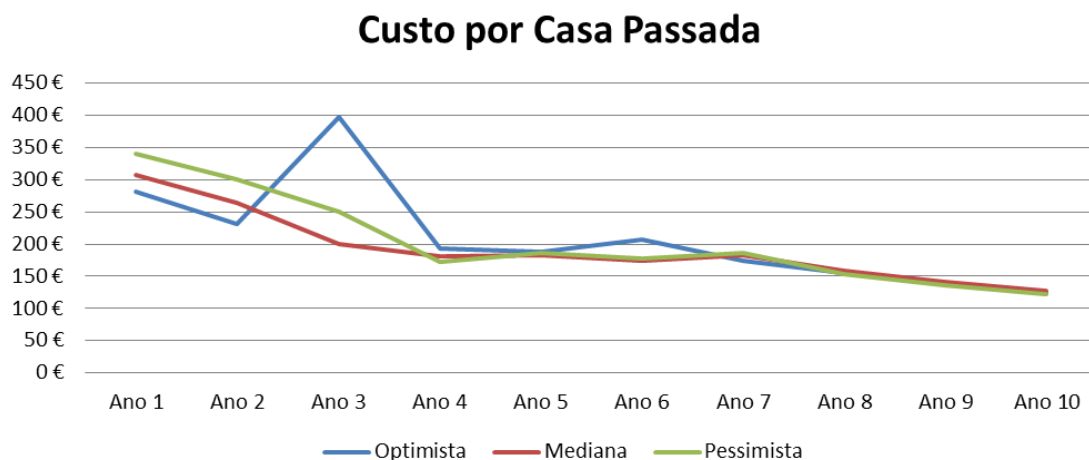


Figura 109 – Comparação do custo por casa passada das 3 penetrações de mercado, para os 10 anos de avaliação económica.

Também o indicador custo por casa passada se mantém ligeiramente favorável para a penetração optimista, exceptuando o ano de forte investimento (ano 4), compensado nos períodos seguintes pela grande adesão ao serviço.

5.3.8 Análise de sensibilidade

Através da análise realizada para a configuração A, retirou-se a conclusão que se for considerada uma penetração rápida e optimista de mercado, o seu balanço final é superior.

A variação de parâmetros de entrada como a dimensão do mercado ou área da região a servir, irão resultar em diferentes resultados para o projecto de investimento. No gráfico da **Figura 110** é visível o decréscimo acentuado do custo por casa servida, quando a distância media OLT-ONU diminui no intervalo [1km; 15km].

Sensibilidade do custo por casa servida em função de L

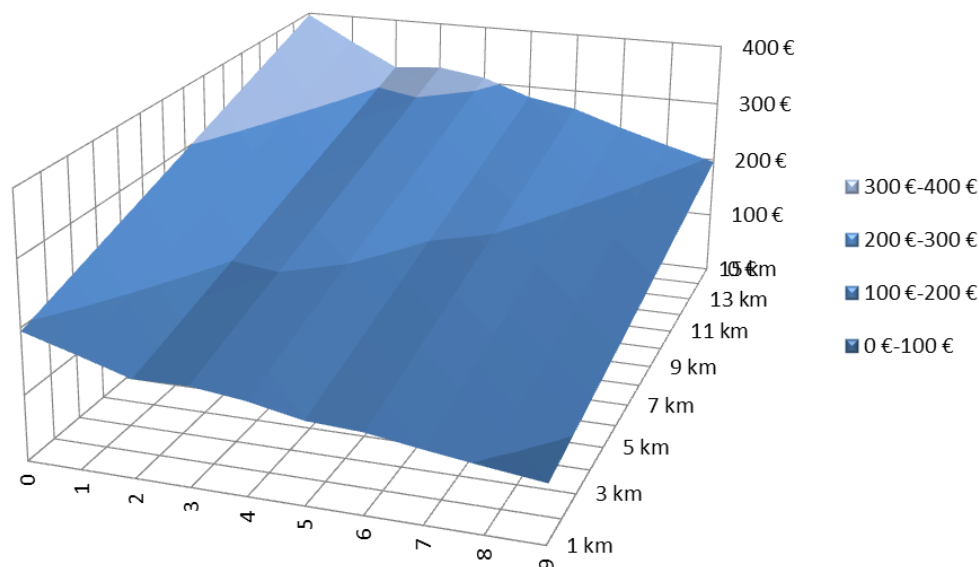


Figura 110 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de L , ao longo do tempo, para o caso “optimista”.

Também a variação do número de habitações ou potenciais clientes, resultará na alteração dos custos por casa servida. A **Figura 111** mostra isso mesmo, para um número de habitações no intervalo [5000;65000]. Na referida figura é visível um forte aumento dos custos por casa servida para valores a rondar as 5000 habitações e diferentes outros “picos” de maior custo. Estes “picos” são relativos a valores de número de habitações que obrigam a instalação de equipamento de elevado custo (nomeadamente OLT) para servir poucos clientes.

Sensibilidade do custo por casa servida em função do número de habitações

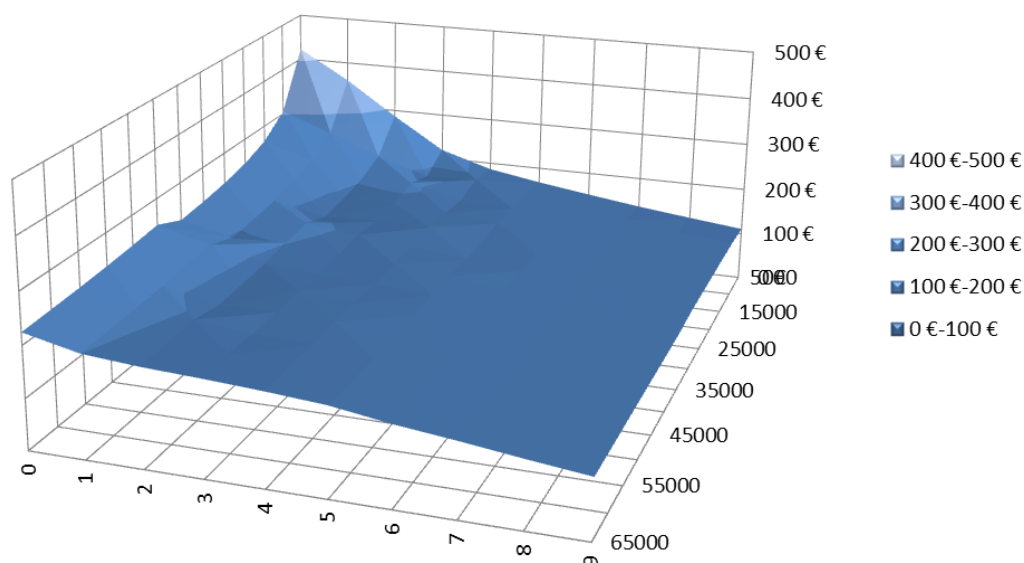


Figura 111 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação do número de habitações, ao longo do tempo, para o caso “optimista”.

Quanto à posição relativa do ponto de flexibilidade da rede ρ , conclui-se que o seu aumento provoca uma diminuição nos custos de investimento em fibra óptica e consequentemente nos custos totais. O gráfico seguinte mostra uma análise de sensibilidade do custo por casa servida com a variação de ρ no intervalo $[0,2; 0,8]$, ao longo do tempo e para o mesmo mercado o caso “optimista”.

Sensibilidade do custo por casa servida em função de ρ

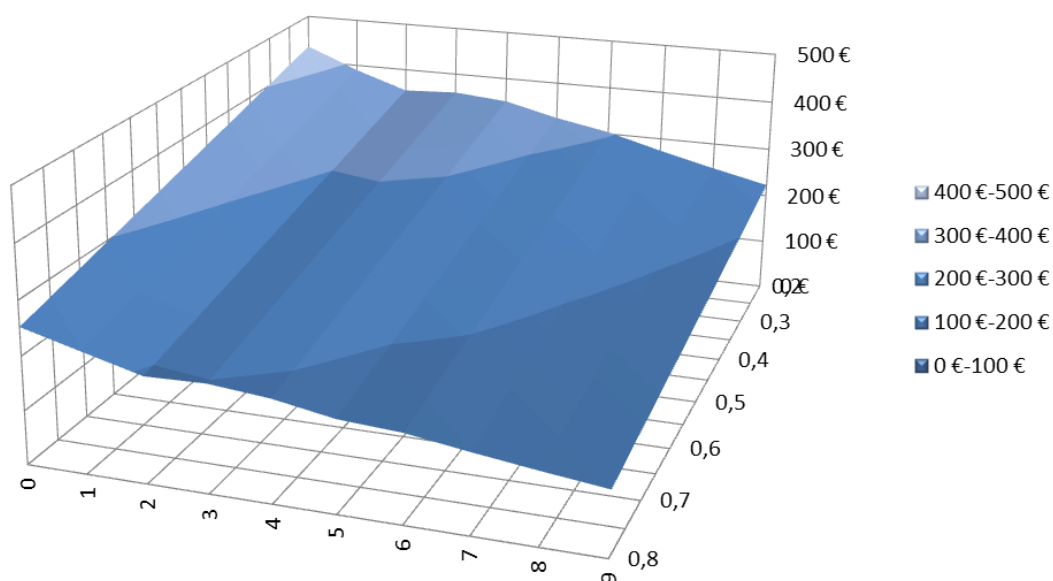


Figura 112 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de ρ , ao longo do tempo, para o caso “optimista”.

5.4 Configuração B – Dois níveis de *Splitting*

A configuração B diferencia-se da configuração anterior por apresentar mais um degrau de *splitting*. Este facto resultará num aumento do número de *splitters* da rede. Esta configuração será utilizada para fazer análises das repercussões no CAPEX da variação dos rácios de *splitting*, assim como a localização dos mesmos (ρ e τ). A figura seguinte, já apresentada na **Secção 4.5**, representa este cenário de estudo.

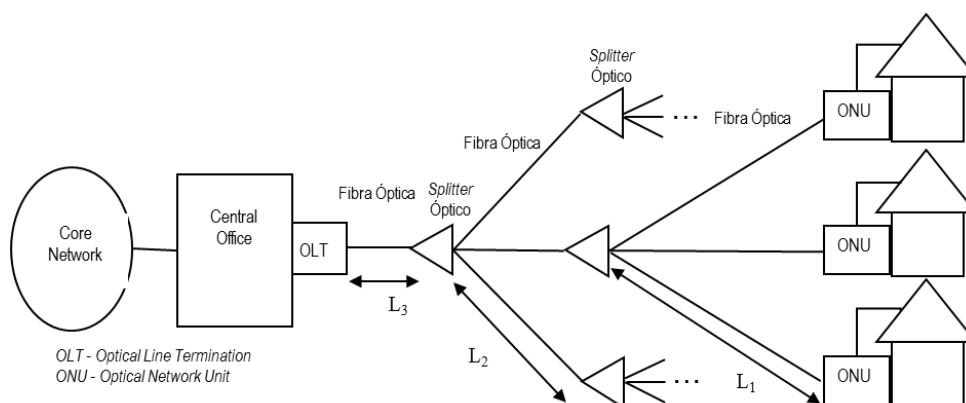


Figura 113 – Configuração com dois degraus de *splitting* [17].

5.4.1 Geografia e Distância Média Optimizada

Esta configuração terá não só a mesma localização da anterior, como os restantes pressupostos relativos à geografia. Deste modo será possível comparar as variações do custo da rede para os cenários de uso de um ou dois degraus de *splitting*. Os parâmetros de entrada estão assim representados na tabela seguinte:

Tabela 60 – Parâmetros de entrada relativos a geografia da configuração B.

Parâmetros	Valores
Mercado Alvo	18000 unidades habitacionais
Área	25 km ²
L_{max}	7,07 km
$\langle L \rangle_{real}$ (distribuição normal)	5 km

Novamente, a distância máxima está dentro dos limites do *link budget*, que para esta para a situação de dois degraus de *splitting* é 65km, naturalmente inferior ao *link budget* da configuração A.

A tabela seguinte mostra a variação do comprimento dos vários segmentos de rede, em função das diversas opções de posição relativa dos dois degraus de *splitting*:

Tabela 61 – Influência dos parâmetros ρ e τ nos comprimentos L_1 , L_2 e L_3 .

	L_1 (km)	L_2 (km)	L_3 (km)
$\rho = 0,5$ $\tau = 0,3$	1	1,5	2,5
$\rho = 0$ $\tau = 0,5$	2,5	2,5	0
$\rho = 0,2$ $\tau = 0,7$	0,5	3,5	1
$\rho = 0,2$ $\tau = 0,3$	2,5	1,5	1
$\rho = 0,7$ $\tau = 0,2$	0,5	1	3,5
$\rho = 0,1$ $\tau = 0,1$	4	0,5	0,5

5.4.2 Mercado

Novamente, serão usados os mesmos pressupostos da configuração A, desta feita, no que toca as diferentes penetrações: optimista, mediana e pessimista. Como o mercado alvo se mantém nas 18000 unidades habitacionais, as tabelas da **Secção 5.3.2** contêm os dados que serão reutilizados neste cenário de estudo.

5.4.3 Material e Custos

Neste caso, todos esses elementos de custo serão também agregados em apenas três itens:

- Item 1 - Equipamento do utilizador (ONU).
- Item 2 - Ponto de agregação / distribuição (bateria de *Splitters*) e fibra.
- Item 3 - Equipamento da Estação Local (*Central Office*).

A tabela fornece seguinte também as proporções válidas (4096 utilizadores por rede) da capacidade dos vários itens de material, necessários para implementar a nova rede. Neste caso serão feitas três opções quanto ao rácio dos splitters, e uma análise aos custos da rede, consoante a opção escolhida.

Tabela 62 - Rácios dos vários componentes das três opções.

	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Item 1	1:1 (1 ONU por cada utilizador)		
Item 2	1:8 (1 splitter de 1º degrau por cada 8 splitters de 2º degrau)	1:8	1:16
	1:4 (1 splitter de 2º degrau por cada ONU)	1:8	1:4
Item 3	1:128 (1 OLT por cada 128 <i>splitters</i>)	1:64	1:64

A configuração B segue os seguintes pressupostos:

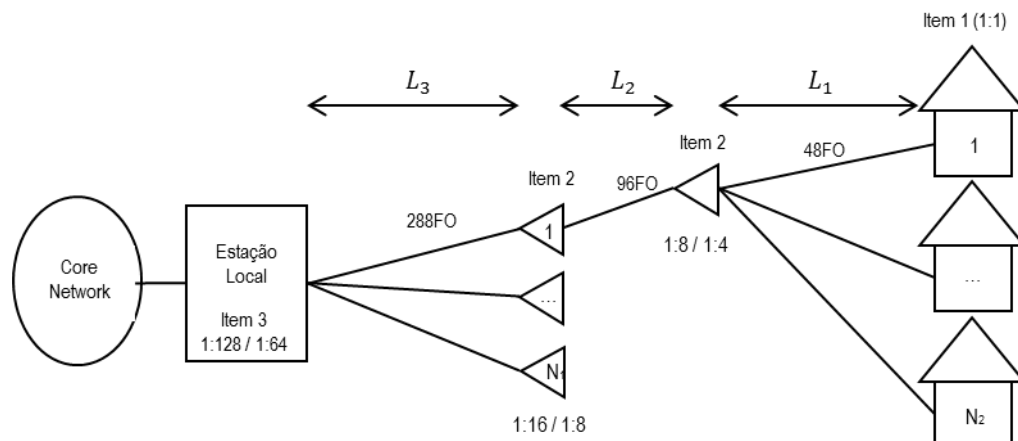


Figura 114 - Solução FTTH com os diferentes itens e respectivos rácios.

- O custo do item 1, no primeiro ano do exercício económico, é de 115€. Este valor sofrerá erosão ao longo dos anos, de acordo com a fórmula (60) e a **Tabela 6**. Quando surge um novo cliente, o operador adquire um ONU pelo valor actual de mercado;
- O custo do Item 2 depende da distância da fibra a instalar (C_F) e do custo total dos *splitters* (C_S), ao valor actualizado de mercado. O custo da fibra poderá sofrer grandes variações, consoante as localizações relativas dos dois degraus de *splitting* (ρ e τ). Para a rede *feeder* serão usados cabos de 288FO, para a rede de distribuição cabos de 96FO e para a rede *drop* serão usados cabos de 48FO. Estes valores seguem mais uma vez a política de instalação de fibra escura. O custo os *splitters* está também dependente do rácio dos mesmos, ou seja da opção 1, 2 ou 3;
- O custo do item 3 está directamente relacionado com o número de utilizadores, sabendo que cada OLT poderá servir um máximo de 4096 clientes. Serão utilizados duas opções para a implementação do OLT: uma que prevê a inclusão de um splitter 1:2 dentro do próprio CO e outra opção que não inclui esse equipamento. A escolha do rácio dos *splitters* da rede está dependente da existência deste *splitters* 1:2.

5.4.4 CAPEX

Para a elaboração do CAPEX, para as três abordagens de penetração de mercado, foi considerado um $\rho = 0,5$, $\tau = 0,3$ e a opção 1, no que toca ao rácio de *splitting*. A escolha destes pressupostos iniciais, não teve qualquer critério inerente, pois ambos os parâmetros serão alvo de uma análise de sensibilidade nas secções seguintes deste documento. No L_1 , L_2 e L_3 estão

representados na **Tabela 61**. Seguidamente são apresentadas as tabelas dos custos totais de cada item, o investimento anual necessário para cada item, o investimento anual total e o investimento acumulado depreciado para a abordagem optimista.

Tabela 63 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Variável
ρ	0,5
τ	0,3
Rácio dos <i>splitters</i>	Opção 1

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 64 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}) para uma abordagem “optimista”.

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
718.957 €	784.745 €	1.038.338 €	1.812.591 €	3.020.436 €	3.771.589 €	4.015.481 €	4.072.431 €	4.086.058 €	4.088.549 €
50.206 €	54.791 €	72.314 €	123.991 €	202.887 €	250.674 €	265.082 €	268.418 €	269.143 €	269.289 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €

Tabela 65 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para uma abordagem “optimista”.

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
769.163 €	70.372 €	271.117 €	825.930 €	1.286.741 €	798.940 €	258.300 €	60.287 €	14.352 €	2.636 €
100.000 €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €	- €

Tabela 66 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “optimista”.

1.082.373 €	90.575 €	351.055 €	1.170.143 €	1.772.949 €	1.040.861 €	434.406 €	78.430 €	18.340 €	3.557 €
1.082.373 €	1.172.949 €	1.524.003 €	2.694.146 €	4.467.096 €	5.507.957 €	5.942.363 €	6.020.793 €	6.039.133 €	6.042.690 €
1.082.373 €	1.064.711 €	1.309.295 €	2.348.509 €	3.886.607 €	4.538.808 €	4.519.333 €	4.145.829 €	3.749.586 €	3.378.185 €

Percentagem do Custo do Equipamento

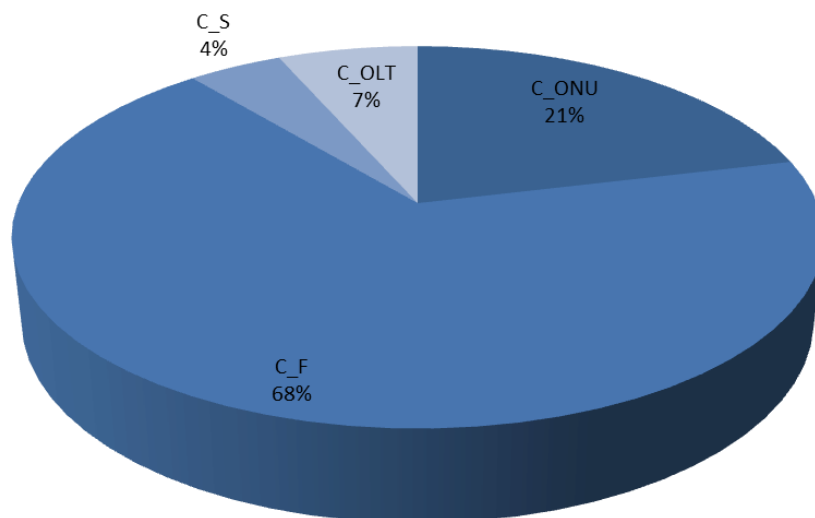


Figura 115 – Representação gráfica das percentagens dos custos em material, para uma abordagem “optimista”.

Investimento Anual

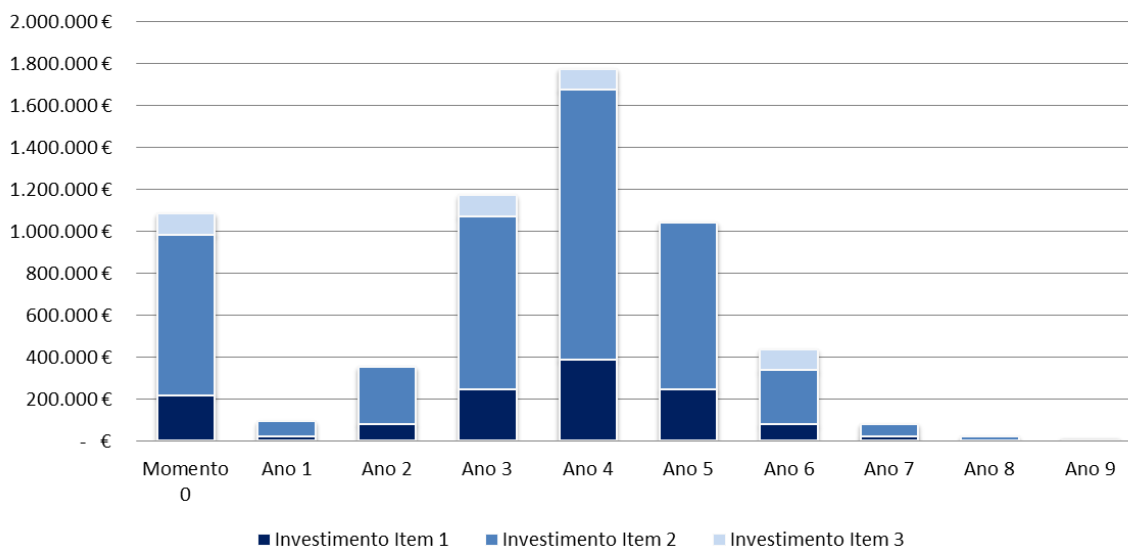


Figura 116 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “optimista”.

Da análise aos gráficos anteriores e em comparação com os resultados para a configuração A, observa-se o aumento brusco da percentagem dos custos da fibra em relação ao investimento total. Tal facto deve-se ao uso de cablagem com uma grande quantidade de fibras, quando apenas uma baixa percentagem dessa fibra é usada. Na configuração A, a percentagem de fibra usada em cada cabo, é superior resultando numa diminuição da fibra escura. Por exemplo, o uso de cabos de 96FO em *splitters* 1:8 resulta em 86 cabos de fibra escura. Esta é a opção tomada pelos operados, mas naturalmente tem a sua desvantagem que será o aumento dos custos. Sabendo que nesta situação, a penetração de mercado é a mesma que para a configuração A, o

custo do item 1 e 3 será igual. Veja-se a comparação entre a configuração A e B para os elementos do item 2 (fibra e *splitters*).

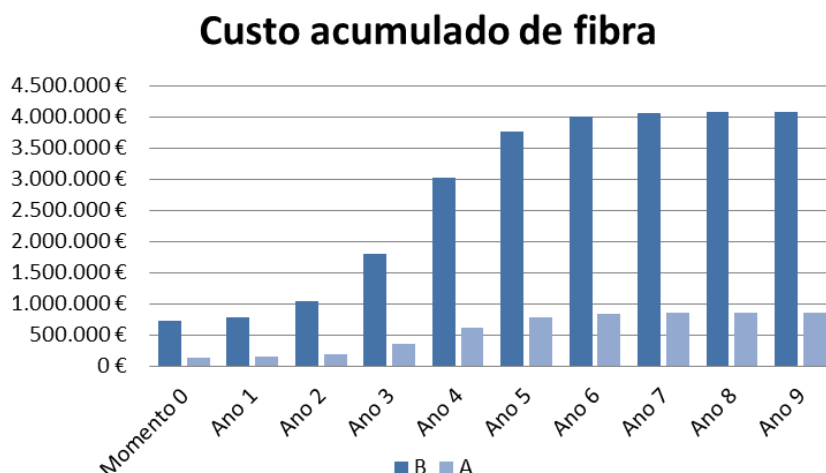


Figura 117 – Comparação entre a configuração A e B para o custo acumulado em cablagem de fibra.

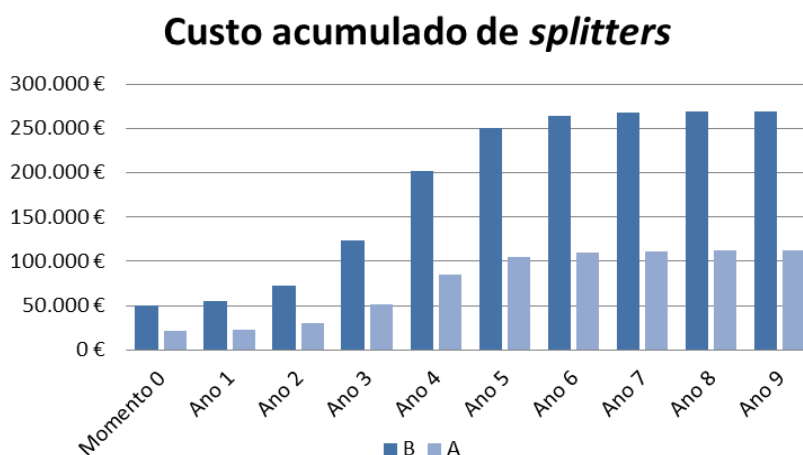


Figura 118 – Comparação entre a configuração A e B para o custo acumulado em *splitters*.

Também pela análise dos gráficos da **Figura 117** e **Figura 118**, se observa os aumentos de custo desta configuração. Se o aumento do custo da fibra já foi explicado anteriormente, o aumento de investimento em *splitters*, justifica-se pela maior quantidade necessária, mesmo sabendo que os *splitters* de rácio mais baixo são de um preço inferior.

Caso a instalação da cablagem de fibra fosse otimizada para o uso de apenas o número de fibras estritamente necessário em ambas as configurações, o resultado do investimento de fibra nesta configuração seria teoricamente inferior, visto que a quantidade de fibra partilhada pelos clientes é maior.

Seguidamente são apresentadas as tabelas de CAPEX e o gráfico do investimento por item, para as restantes penetrações de mercado apresentadas. Como já se viu na configuração A, a

percentagem de investimento de cada item mantém-se inalterado com a variação do tipo de penetração

Tabela 67 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}), para uma abordagem “mediana”.

209.875 €	219.089 €	257.450 €	396.779 €	727.772 €	1.068.486 €	1.214.931 €	1.253.730 €	1.262.574 €	1.264.498 €
710.906 €	738.258 €	860.122 €	1.296.226 €	2.332.724 €	3.396.060 €	3.854.502 €	3.984.118 €	4.011.701 €	4.018.849 €
49.567 €	51.521 €	59.946 €	89.434 €	157.029 €	224.182 €	252.161 €	259.251 €	260.780 €	261.142 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €

Tabela 68 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem “mediana”.

209.875 €	9.214 €	38.361 €	139.329 €	330.993 €	340.714 €	146.445 €	38.799 €	8.843 €	1.925 €
760.473 €	29.306 €	130.290 €	465.592 €	1.104.092 €	1.130.490 €	486.421 €	136.706 €	29.111 €	7.510 €
100.000 €	- €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €

Tabela 69 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem “mediana”.

1.070.348 €	38.520 €	168.651 €	604.920 €	1.535.085 €	1.571.204 €	632.866 €	275.505 €	37.955 €	9.435 €
1.070.348 €	1.108.868 €	1.277.519 €	1.882.439 €	3.417.525 €	4.988.729 €	5.621.594 €	5.897.099 €	5.935.054 €	5.944.489 €
1.070.348 €	1.001.833 €	1.070.301 €	1.568.191 €	2.946.457 €	4.223.016 €	4.433.580 €	4.265.727 €	3.877.109 €	3.498.833 €

Investimento Anual

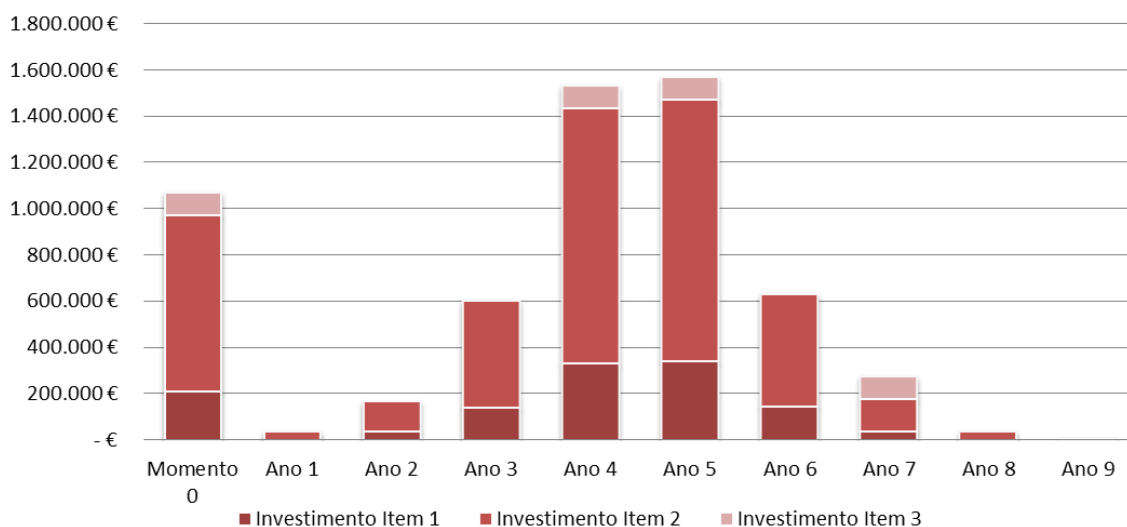


Figura 119 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem “mediana”.

Tabela 70 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), *splitters* (C_s) e OLT (C_{OLT}), para uma abordagem “pessimista”.

208.150 €	211.924 €	227.676 €	291.393 €	497.278 €	864.497 €	1.126.311 €	1.214.867 €	1.236.368 €	1.241.139 €
703.305 €	714.812 €	766.191 €	964.987 €	1.612.387 €	2.758.106 €	3.574.195 €	3.853.488 €	3.931.340 €	3.947.297 €
66.409 €	67.216 €	70.736 €	84.190 €	126.231 €	198.601 €	248.476 €	264.739 €	268.573 €	269.394 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €

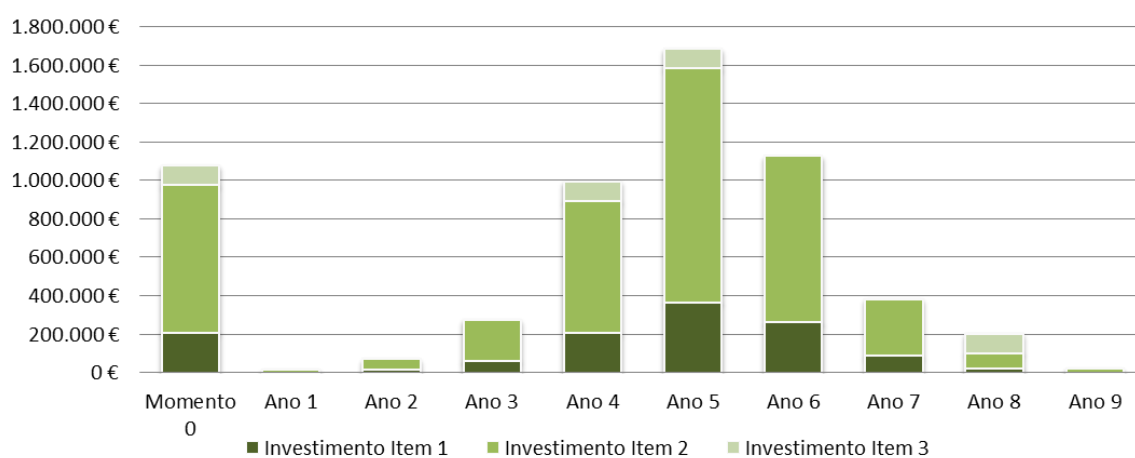
Tabela 71 - Investimento anual dos Item 1, 2 e 3, para uma abordagem "pessimista".

208.150 €	3.774 €	15.752 €	63.717 €	205.885 €	367.220 €	261.814 €	88.556 €	21.501 €	4.771 €
769.714 €	12.314 €	54.899 €	212.251 €	689.441 €	1.218.089 €	865.963 €	295.556 €	81.686 €	16.778 €
100.000 €	- €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	- €	100.000 €	- €

Tabela 72 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para uma abordagem "pessimista".

1.077.864 €	16.088 €	70.651 €	275.967 €	995.326 €	1.685.309 €	1.127.778 €	384.112 €	203.188 €	21.549 €
1.077.864 €	1.093.951 €	1.164.603 €	1.440.570 €	2.435.896 €	4.121.204 €	5.248.982 €	5.633.094 €	5.836.282 €	5.857.830 €
1.077.864 €	986.165 €	958.200 €	1.138.347 €	2.019.838 €	3.503.163 €	4.280.624 €	4.236.674 €	4.016.194 €	3.636.123 €

Investimento Anual


Figura 120 – Representação gráfica do investimento por item, ao longo dos 10 anos de estudo económico, para uma abordagem "pessimista".

De toda esta informação referente a custos de investimento, é possível construir o gráfico que permite comparar o investimento total realizado por ano, em função da penetração do mercado.

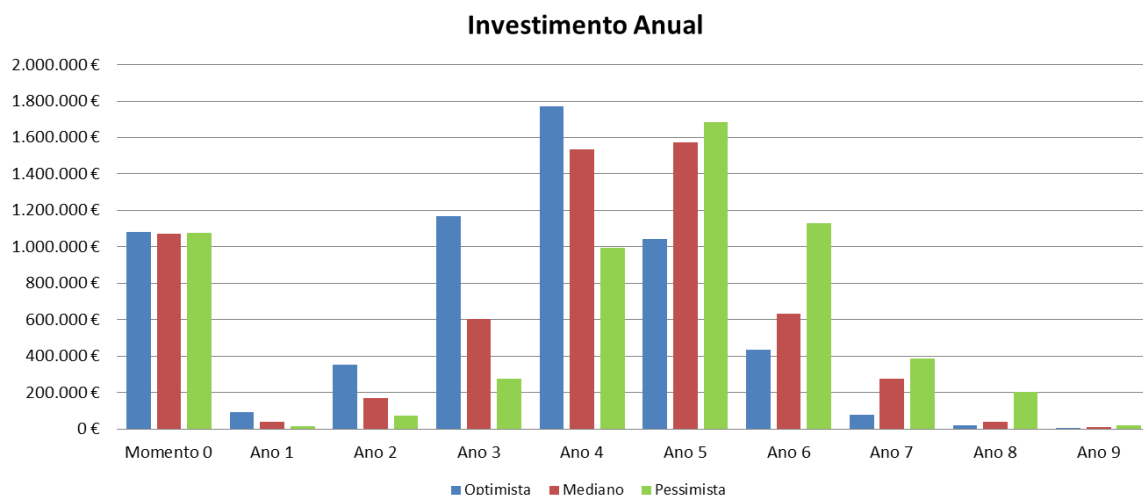


Figura 121 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.

Do gráfico da **Figura 121** é possível concluir, que o investimento realizado é maior nos primeiros anos para uma penetração optimista, sendo superior nos últimos anos para uma abordagem pessimista.

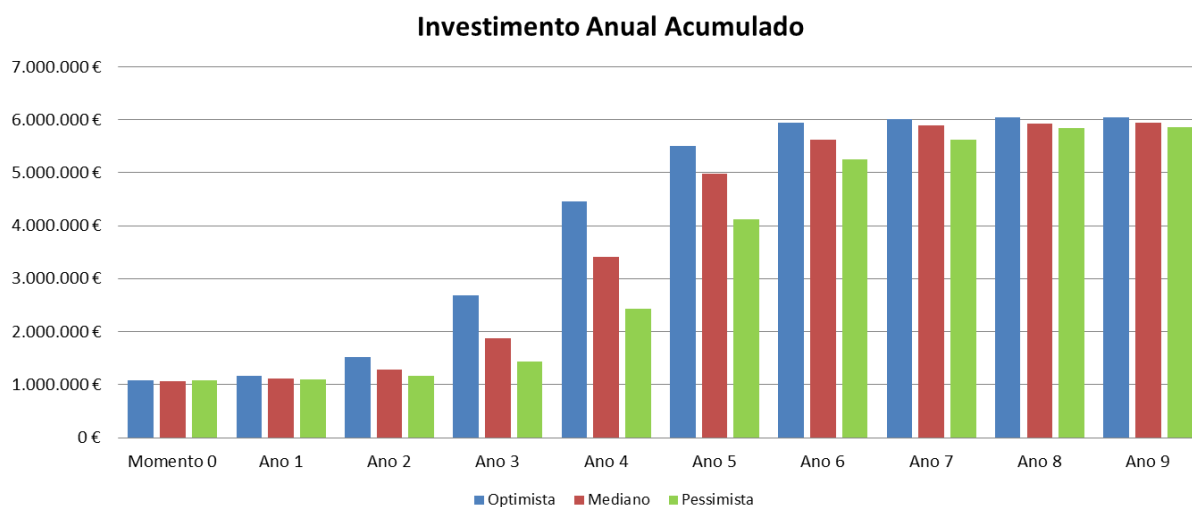


Figura 122 – Investimento anual total ao longo dos 10 anos deste estudo económico, para as três abordagens de mercado.

Pelo análise gráfica da **Figura 122**, é ainda possível retirar que, o investimento total diminui ligeiramente para a abordagem mediana em relação à optimista, e um pouco mais quando a penetração considerada é a pessimista. Tal facto deve-se à erosão do preço dos equipamentos. Ou seja, quanto mais tarde for feito o investimento em equipamento, menor será o valor pago, seja fibra, *splitters* ou terminais ONU.

5.4.4.1 Parâmetro ρ e τ

Para a realização do estudo do impacto dos parâmetros ρ e τ , será considerada a abordagem optimista de mercado e a opção 1 no que toca a rácio dos pontos de agregação. Todos os outros pressupostos da análise anterior manter-se-ão, e serão agora considerados os valores para ρ e τ já apresentados na **Tabela 61**.

Tabela 73 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Optimista
ρ	<u>Variável</u>
τ	<u>Variável</u>
Rácio dos <i>splitters</i>	Opção 1

Os resultados, relativos à alteração destes parâmetros sobre o investimento em fibra (único custo que se modificará), são expressos nas tabelas seguintes.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 74 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,5$ e $\tau = 0,3$.

718.957 €	784.745 €	1.038.338 €	1.812.591 €	3.020.436 €	3.771.589 €	4.015.481 €	4.072.431 €	4.086.058 €	4.088.549 €
-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 75 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0$ e $\tau = 0,5$.

1.624.242 €	1.774.563 €	2.357.211 €	4.111.861 €	6.862.789 €	8.586.008 €	9.126.849 €	9.258.082 €	9.288.495 €	9.294.723 €
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 76 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,2$ e $\tau = 0,7$.

677.401 €	741.420 €	981.153 €	1.712.947 €	2.856.775 €	3.572.609 €	3.798.220 €	3.851.214 €	3.866.065 €	3.867.310 €
-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 77 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,2$ e $\tau = 0,3$.

1.512.725 €	1.651.728 €	2.193.309 €	3.826.099 €	6.384.022 €	7.983.511 €	8.489.766 €	8.612.082 €	8.639.573 €	8.645.801 €
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 78 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,7$ e $\tau = 0,2$.

398.609 €	434.333 €	571.396 €	998.541 €	1.659.857 €	2.066.366 €	2.205.510 €	2.236.215 €	2.243.759 €	2.245.004 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 79 – Investimento acumulado em fibra (C_f), para um $\rho = 0,1$ e $\tau = 0,1$.

2.194.976 €	2.395.877 €	3.184.377 €	5.553.844 €	9.268.842 €	11.592.935 €	12.326.967 €	12.505.733 €	12.544.165 €	12.554.129 €
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Com a informação recolhida das tabelas anteriores, é possível desenhar o gráfico, onde se representa o investimento acumulado em fibra óptica ao longo dos anos, para as várias opções de posicionamento relativo dos dois degraus de splitting (**Figura 123**).

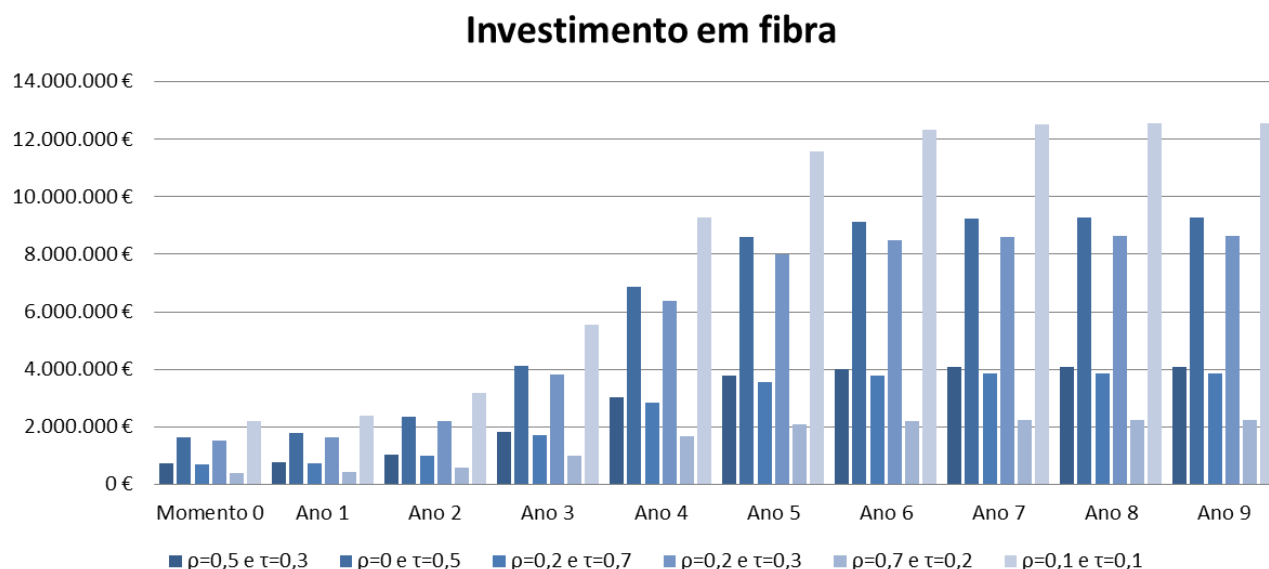


Figura 123 – Investimento acumulado em fibra óptica para as diferentes opções de um ρ e τ .

Da análise da figura, retira-se que as opções, que requerem um investimento mais baixo, são com $\rho = 0,7 / \tau = 0,2$, $\rho = 0,2 / \tau = 0,7$ e $\rho = 0,5 / \tau = 0,3$. Estas destacam-se por terem um segmento *drop* bastante baixo, segmento no qual é necessário uma fibra por utilizador (do último *splitter* ao ONU. A melhor opção ($\rho = 0,7 / \tau = 0,2$) passa ainda por colocar o primeiro degrau de splitting o mais longe possível do OLT, aumentando o segmento onde a fibra é partilhada por mais clientes. As restantes opções acabam por contrariar os dois critérios anteriormente referenciados como escolha para um baixo custo.

5.4.4.2 Rácio de Splitting

Nesta secção é apresentada uma análise aos custos de investimento dos diversos itens, consoante a opção de escolha relativa a rácios de splitting, representados na **Tabela 62**.

A análise desta secção é realizada com os seguintes pressupostos:

Tabela 80 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Optimista
ρ	0,5
τ	0,3
Rácio dos <i>splitters</i>	<u>Variável</u>

Seguidamente são apresentadas as tabelas dos custos totais de cada item, o investimento anual necessário para cada item, o investimento anual total e o investimento acumulado depreciado para a abordagem optimista.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 81 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), splitters (C_s) e OLT (C_{OLT}) para a opção 1.

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
718.957 €	784.745 €	1.038.338 €	1.812.591 €	3.020.436 €	3.771.589 €	4.015.481 €	4.072.431 €	4.086.058 €	4.088.549 €
50.206 €	54.791 €	72.314 €	123.991 €	202.887 €	250.674 €	265.082 €	268.418 €	269.143 €	269.289 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €

Tabela 82 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 1.

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
769.163 €	70.372 €	271.117 €	825.930 €	1.286.741 €	798.940 €	258.300 €	60.287 €	14.352 €	2.636 €
100.000 €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €	- €

Tabela 83 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 1.

1.082.373 €	90.575 €	351.055 €	1.170.143 €	1.772.949 €	1.040.861 €	434.406 €	78.430 €	18.340 €	3.557 €
1.082.373 €	1.172.949 €	1.524.003 €	2.694.146 €	4.467.096 €	5.507.957 €	5.942.363 €	6.020.793 €	6.039.133 €	6.042.690 €
1.082.373 €	1.064.711 €	1.309.295 €	2.348.509 €	3.886.607 €	4.538.808 €	4.519.333 €	4.145.829 €	3.749.586 €	3.378.185 €

Tabela 84 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), splitters (C_s) e OLT (C_{OLT}) para a opção 2.

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
365.104 €	398.541 €	526.163 €	918.066 €	1.525.808 €	1.902.559 €	2.027.641 €	2.055.689 €	2.062.922 €	2.063.753 €
35.263 €	38.536 €	50.854 €	87.144 €	142.555 €	176.158 €	186.242 €	188.550 €	189.088 €	189.160 €
95.000 €	95.000 €	95.000 €	190.000 €	285.000 €	285.000 €	380.000 €	380.000 €	380.000 €	380.000 €

Tabela 85 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 2.

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
400.368 €	36.709 €	139.940 €	428.194 €	663.153 €	410.353 €	135.166 €	30.357 €	7.771 €	902 €
95.000 €	- €	- €	95.000 €	95.000 €	- €	95.000 €	- €	- €	- €

Tabela 86 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 2.

708.578 €	56.913 €	219.877 €	767.407 €	1.144.362 €	652.275 €	306.272 €	48.499 €	11.760 €	1.823 €
708.578 €	765.490 €	985.368 €	1.752.775 €	2.897.136 €	3.549.411 €	3.855.683 €	3.904.182 €	3.915.942 €	3.917.765 €
708.578 €	694.633 €	845.047 €	1.527.949 €	2.519.516 €	2.919.839 €	2.934.127 €	2.689.214 €	2.432.052 €	2.190.669 €

Tabela 87 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), splitters (C_s) e OLT (C_{OLT}) para a opção 3.

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
631.944 €	689.243 €	913.375 €	1.593.368 €	2.652.497 €	3.312.026 €	3.526.273 €	3.576.537 €	3.587.971 €	3.590.462 €
49.475 €	60.003 €	100.733 €	220.413 €	403.156 €	513.817 €	547.258 €	555.050 €	556.634 €	557.024 €
95.000 €	95.000 €	95.000 €	190.000 €	285.000 €	285.000 €	380.000 €	380.000 €	380.000 €	380.000 €

Tabela 88 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, para a opção 3.

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
681.419 €	67.827 €	264.861 €	799.673 €	1.241.872 €	770.191 €	247.687 €	58.055 €	13.019 €	2.881 €
95.000 €	- €	- €	95.000 €	95.000 €	- €	95.000 €	- €	- €	- €

Tabela 89 – Investimento anual dos três itens e investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, para a opção 3.

989.629 €	88.031 €	344.799 €	1.138.886 €	1.723.080 €	1.012.112 €	418.794 €	76.198 €	17.008 €	3.801 €
989.629 €	1.077.660 €	1.422.458 €	2.561.345 €	4.284.425 €	5.296.538 €	5.715.331 €	5.791.529 €	5.808.537 €	5.812.338 €
989.629 €	978.697 €	1.225.626 €	2.241.950 €	3.740.835 €	4.378.864 €	4.359.771 €	3.999.992 €	3.617.000 €	3.259.102 €

Com a informação recolhida das tabelas anteriores, é possível desenhar o gráfico, onde se representa o investimento acumulado ao longo dos anos, para as várias opções de rácio do equipamentos *splitter* e OLT (**Figura 124**).

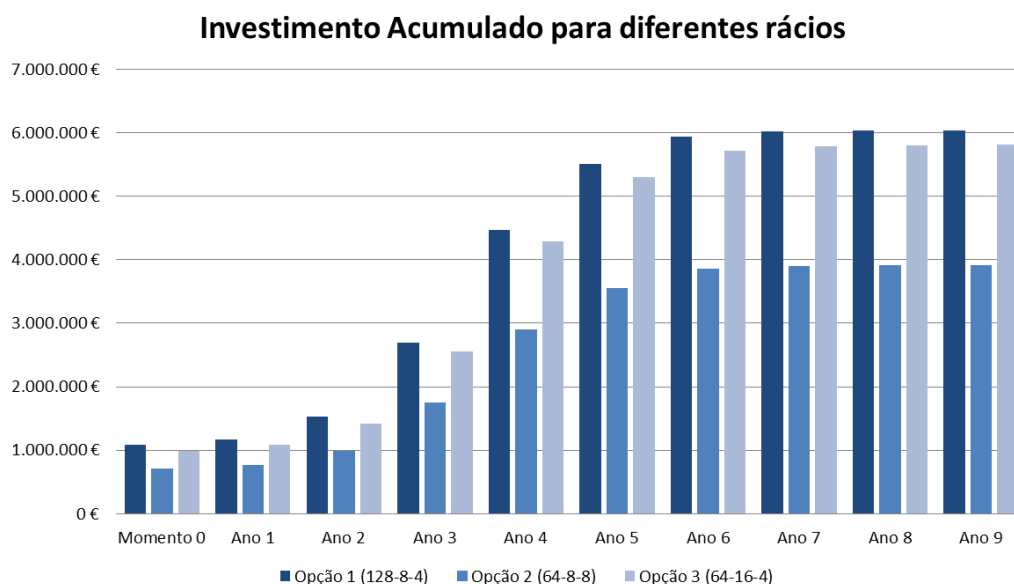


Figura 124 – Investimento acumulado para as três opções de rácio do equipamento.

Analisando o gráfico observa-se que a opção 2 é a que menores custos acarreta. Tal facto deve-se ao menor número de splitters usados, e consequentemente ao menor investimento em fibra. Também o OLT necessita de menor investimento, devido ao facto de não apresentar *splitter* 1:2 no interior do CO. Esta opção apresenta a desvantagem de implementar uma menor quantidade de fibra escura, razão pela qual o custo da fibra é inferior.

5.4.4.3 Investimento Faseado

Partindo do princípio que se conhecem os valores do CAPEX para o caso de um investimento contínuo, seguindo o ritmo de adesão ao serviço, pode-se agora apresentar valores

do CAPEX para o caso mais realista e próximo da política de investimento dos operadores, de investimento faseado. Serão estes valores que entrarão no apuramento de resultados. É importante salientar que o valor de investimento faseado contém o custo por intervenção já adicionado, enquanto o valor do investimento, descrito na **Secção 5.4.4**, não engloba esse valor. Tal deve-se ao facto de que o número de intervenções ser facilmente contabilizável nesta situação, enquanto anteriormente, teria que ser realizado uma intervenção por cada novo cliente que surgisse.

Tabela 90 – Parâmetros usados para análise económica nesta secção.

Parâmetro	Valor
Penetração de mercado	Optimista
ρ	0,5
τ	0,3
Rácio dos <i>splitters</i>	Opção 1

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 91 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “optimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.

10%	11%	15%	29%	50%	64%	69%	70%	70%	70%
20%	20%	30%	30%	60%	75%	75%	75%	75%	75%
10%	9%	15%	1%	10%	11%	6%	5%	5%	5%

Tabela 92- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “optimista”.

1.192.949 €	- €	1.541.198 €	- €	1.792.949 €	1.930.590 €	- €	- €	- €	- €
1.192.949 €	1.192.949 €	2.734.146 €	2.734.146 €	4.527.096 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €
1.192.949 €	1.073.654 €	2.507.486 €	2.256.738 €	3.824.013 €	5.372.202 €	4.834.982 €	4.351.483 €	3.916.335 €	3.524.702 €

A mesma análise feita na **Secção 5.3.4.3** no que toca ao ponto de menor margem, visível na **Figura 125**. Sabendo que o mercado é o mesmo da análise feita na configuração A, a percentagem de casa passadas segue também a mesma linha de ideias em relação aos pontos de investimento (**Figura 126**).

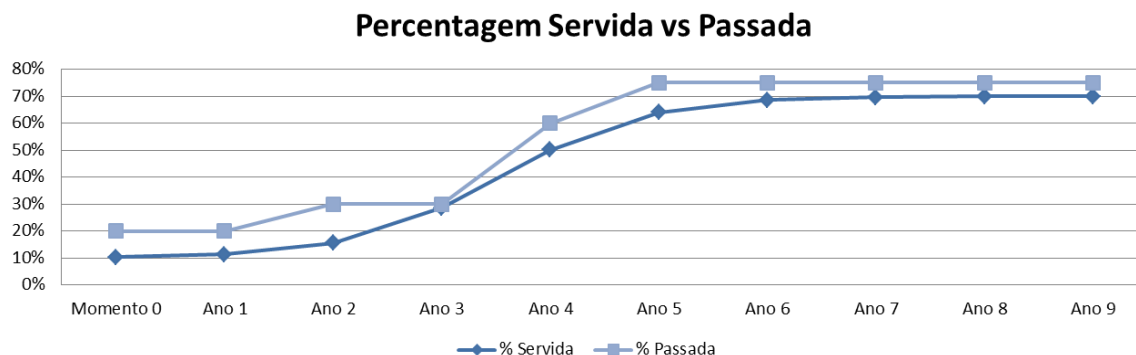


Figura 125 – Percentagem de mercado servido, seguindo o método de investimento faseado, em comparação com a percentagem de mercado passado.

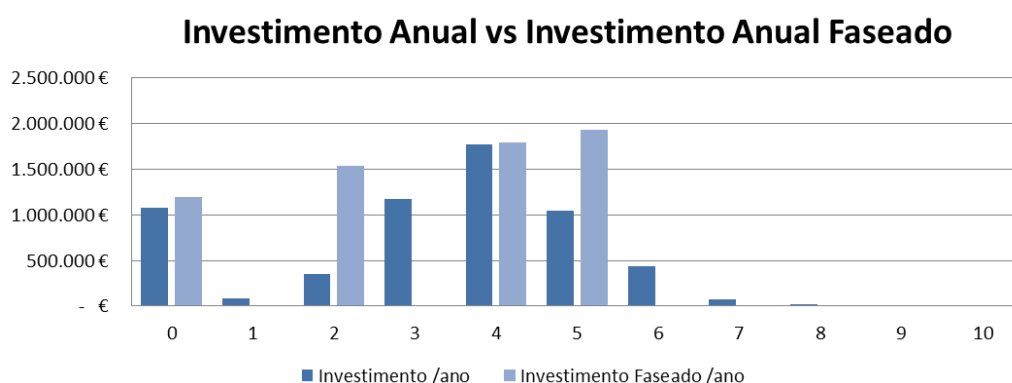


Figura 126 – Comparação entre o investimento anual e o investimento anual faseado, para uma penetração de mercado “optimista”.

5.4.5 OPEX e Receitas

Tanto o OPEX como as receitas não são directamente dependentes de parâmetros de entrada como ρ e τ ou do rácio dos *splitters*, dependendo directamente da penetração de mercado. Esses valores são apresentados na configuração A, nas **Secções 5.3.5** e **5.3.6**, pois o mercado e as suas abordagens são iguais em ambas as configurações.

5.4.6 Resultados

Recorrendo às ferramentas do Microsoft Excel e às equações da **Secção 5.1.3.4**, foi possível calcular facilmente os resultados deste exercício económico: fluxo líquido anual, balanço, VAL, TIR, tempo de recuperação do investimento e custo por casa passada / servida.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 93 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, para uma penetração de mercado “optimista”.

-1.192.949 €	0 €	-1.541.198 €	0 €	-1.792.949 €	-1.930.590 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-1.192.949 €	-1.192.949 €	-2.734.146 €	-2.734.146 €	-4.527.096 €	-6.457.686 €	-6.457.686 €	-6.457.686 €	-6.457.686 €	-6.457.686 €	-6.457.686 €
0 €	-341.775 €	-363.615 €	-607.255 €	-890.575 €	-1.534.030 €	-2.028.289 €	-2.126.449 €	-2.150.689 €	-2.156.209 €	-2.157.529 €
0 €	1.019.700 €	1.063.810 €	1.380.915 €	2.425.214 €	4.036.734 €	4.903.102 €	4.988.664 €	4.816.816 €	4.592.760 €	4.366.935 €
0 €	677.925 €	700.195 €	773.661 €	1.534.639 €	2.502.704 €	2.874.813 €	2.862.216 €	2.666.128 €	2.436.552 €	2.209.407 €
0 €	677.925 €	1.378.120 €	2.151.781 €	3.686.420 €	6.189.124 €	9.063.937 €	11.926.153 €	14.592.281 €	17.028.832 €	19.238.239 €
-1.192.949 €	-515.024 €	-1.356.026 €	-582.366 €	-840.676 €	-268.562 €	2.606.252 €	5.468.467 €	8.134.595 €	10.571.147 €	12.780.553 €

Tabela 94 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação, para uma penetração de mercado “optimista”.

VAL	20.646.533 €
TIR	37,08%
Tempo de Recuperação	7

Tabela 95 – Custo por casa servida e custo por casa passada, para uma abordagem “optimista”.

584 €	523 €	471 €	457 €	431 €	394 €	366 €	331 €	298 €	268 €
643 €	527 €	901 €	439 €	424 €	466 €	392 €	347 €	311 €	280 €

Custo por Casa Servida e Passada

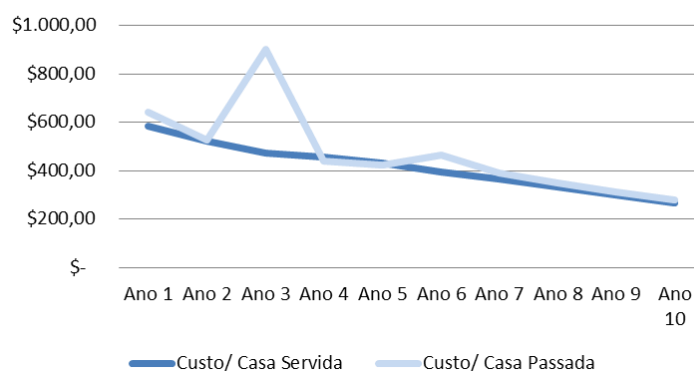


Figura 127 – Custo por casa servida e passada para uma penetração optimista.

Dos valores apresentados anteriormente, ressalta à vista que este cenário apresenta piores resultados que a configuração A, o *payback* aumenta em 2 anos e a VAL e TIR diminuem o seu valor. O custo por casa servida apresenta naturalmente um pico no Ano 3, resultante do forte investimento realizado nesse ano e é em todo o período superior ao mesmo indicador para a configuração A. O balanço apresenta-se positivo a partir do Ano 6, sendo que a partir desse mesmo ano entra em forte crescimento (**Figura 128**). O custo por casa passada desce naturalmente com o aumento de adesão dos assinantes.

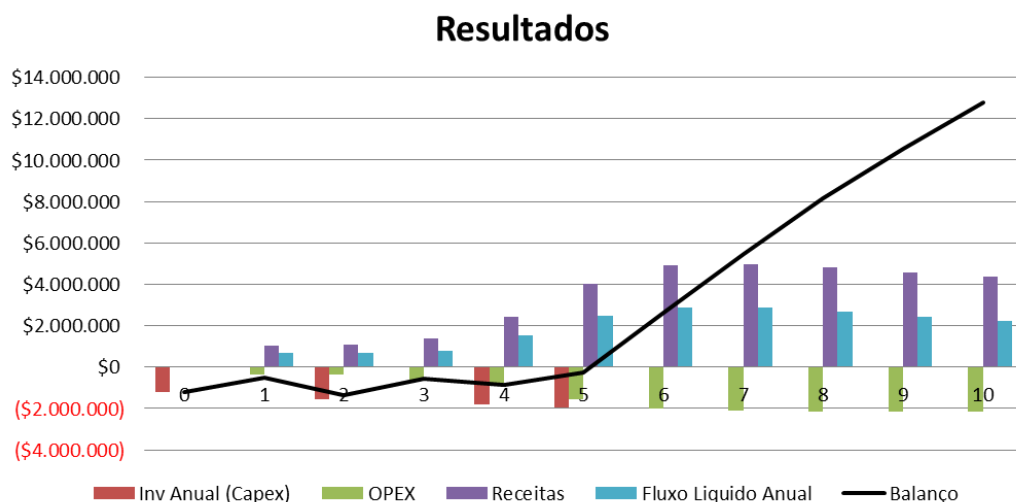


Figura 128 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, para uma abordagem “optimista”.

5.4.7 Análise de sensibilidade

No caso da configuração B, observou-se a análise de critérios como os parâmetros ρ e τ ou o rácio de *splitting*. Apesar de várias soluções apresentadas para ambos os casos ρ e τ , estes poderão ser alvo de uma análise mais profunda, concretamente a da sensibilidade ao custo por casa servida, em função da variação dos mesmos. Assim, para um $\tau = 0,1$, fez variar ρ entre $[0; 0,9]$.

Sensibilidade do custo por casa servida em função de ρ

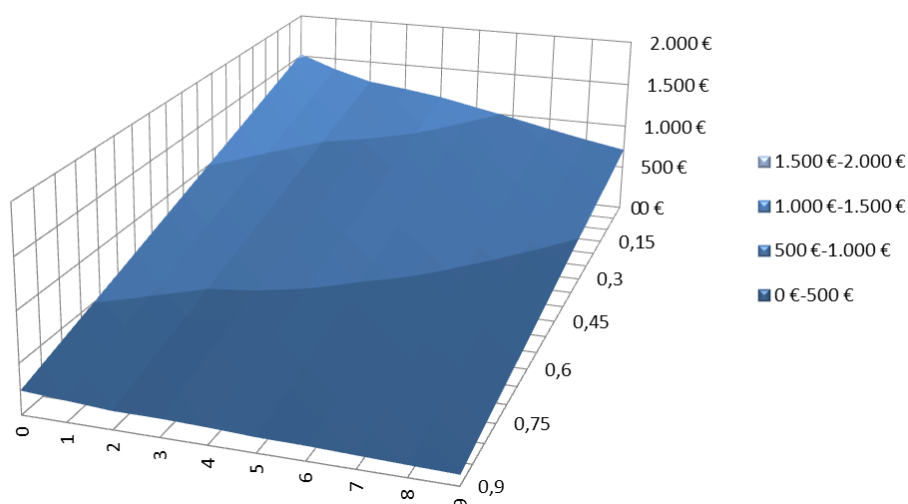


Figura 129 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de ρ (com $\tau = 0,1$), ao longo do tempo, para os 10 anos de estudo de exercício económico.

Observa-se que, mantendo um valor de τ fixo e muito baixo, a variação de ρ poderá tomar maior amplitude de valores (deste 1500€ até custos próximos de 100€) que a variação do mesmo, mas para o caso de apenas um degrau de *splitting*.

Da mesma forma fez-se variar τ entre $[0; 0,9]$, para um $\rho = 0,1$.

Sensibilidade do custo por casa servida em função de τ

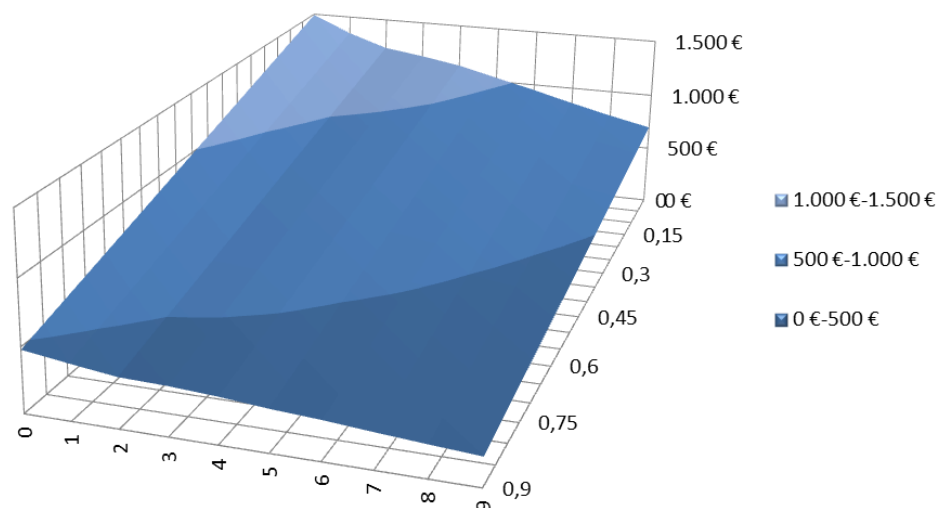


Figura 130 – Sensibilidade do custo por casa servida à variação de τ (com $\rho = 0,1$), ao longo do tempo, para os 10 anos de estudo de exercício económico.

Ao observar o gráfico da **Figura 130**, verifica-se que a alteração de τ também poderá afectar o custo por casa servida em grande escala, podendo atingir valores na ordem dos 1500€ para $\tau = 0$ (no primeiro período do estudo económico), até um custo de 220€ para $\tau = 0,9$ (no último período do estudo económico).

5.5 Configuração C – Localização distante

Para este cenário, que tem por base a configuração A deste trabalho, foi adicionada uma localização remota (por exemplo uma zona industrial, uma vila ou aldeia remotas) que será servida pela mesma rede. Será adaptada à configuração da rede, de modo a que se adapte mais facilmente aos novos condicionalismos.

Esta configuração é apresentada para mostrar as limitações dos modelos matemáticos e cálculos efectuados para representação da distância média ao cliente, assim como para mostrar a limitação do *link budget*.

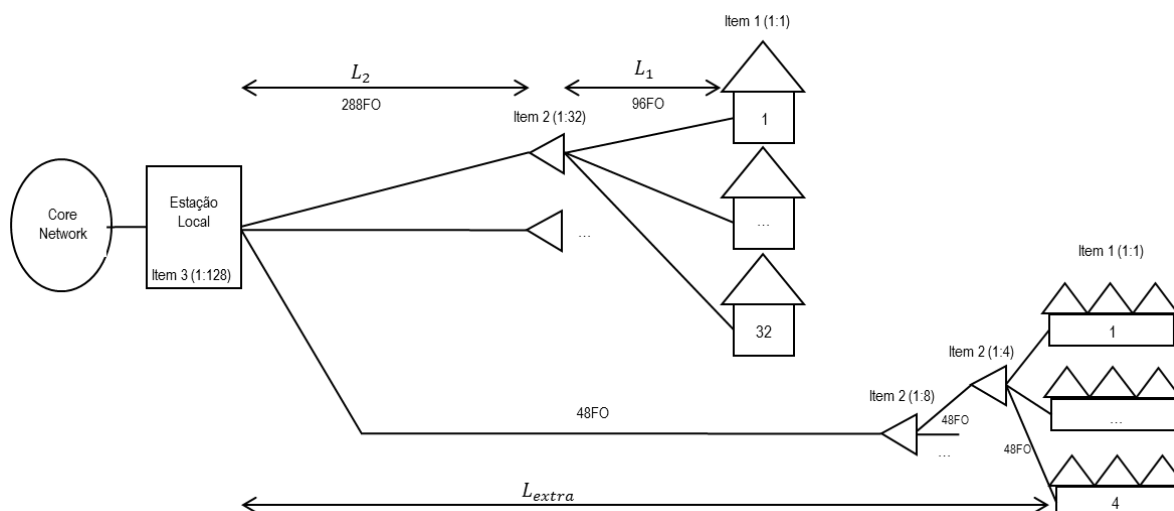


Figura 131 – Configuração com um degrau de *splitting* na localização principal e uma ligação remota com dois degraus de *splitting*.

Neste cenário terá que se assumir um $L_{extra} \leq 66km$, pois este valor representa o limite do *link budget* para a caso da configuração de dois degraus de *splitting* (como é o caso da localização remota). Pode-se assim dizer, que desconhecendo o L_{extra} , o *link budget* torna-se limitativo.

5.5.1 Geografia e Distância Média Optimizada

Para este cenário pretende-se servir novamente a região urbana da cidade de Aveiro, e para isso foi apresentada uma configuração com apenas de um degrau de *splitting* (Configuração A – Um nível de *Splitting*), com uma penetração de mercado optimista. Adicionalmente, e já no decorrer do projecto de investimento (nomeadamente no ano 3), surgiu o interesse da Zona Industrial de Travassô (**Figura 132**) em investir em soluções de Internet de nova geração. Essa zona industrial de apenas $1 km^2$ apresenta uma área quadrada (consequentemente, de diagonal $\sqrt{2}$)

O operador opta por levar estes serviços às 50 empresas dessa zona industrial fazendo passar um cabo *feeder* de 48 fibras ópticas a partir do *central office* de Aveiro. Dentro da zona remota são usados *splitters* de rácio 1:8 e 1:4 com e cabos de 48FO (**Figura 131**). Ainda na mesma zona, o segundo degrau de *splitting* encontra-se a uma distância relativa de 0,8 ($\rho = 0,8$) em relação à distância média da unidade empresarial ($\sqrt{2}/2$), sabendo que se segue uma distribuição gaussiana. O investimento com vista a servir a zona industrial é feito no decorrer do ano 2.

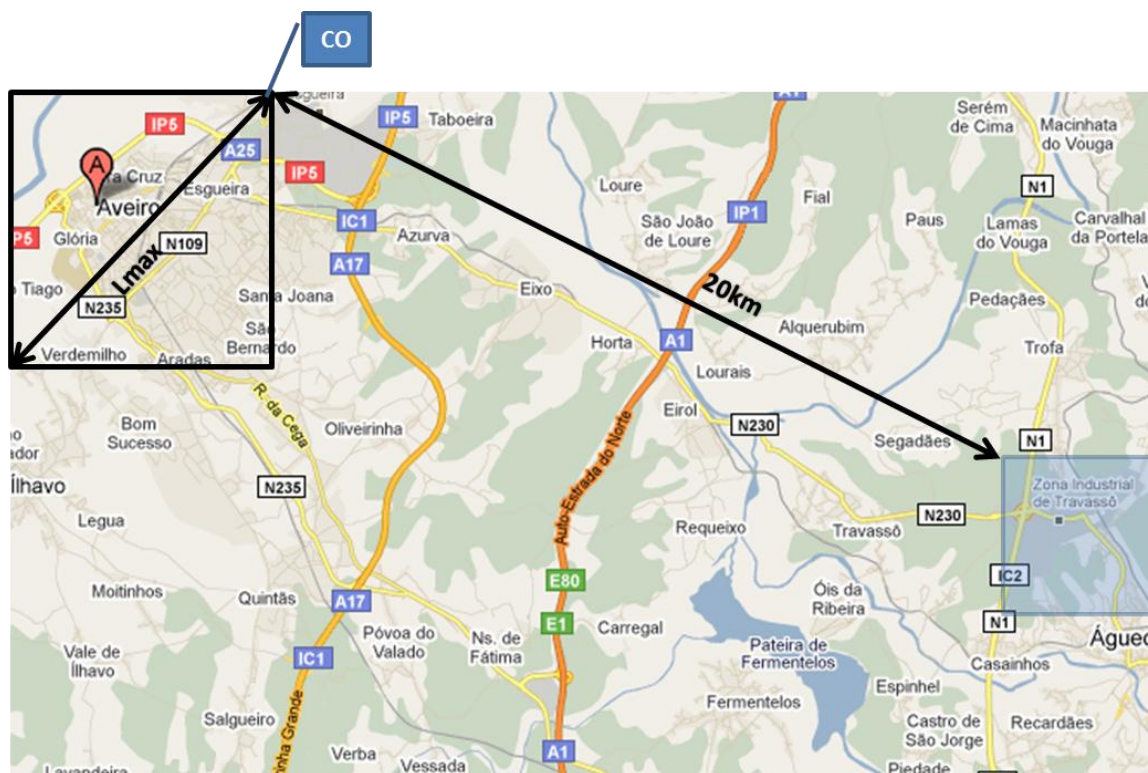


Figura 132 – Representação da localização do CO e L_{max} em relação à área a cobrir, com adição de uma localização remota, neste caso distanciada de 20km.

Existem aproximadamente 18000 unidades habitacionais, as quais se encontram na área urbana de Aveiro, com 25 km^2 . A distância máxima (L_{max}), no pior caso, que um cliente poderá estar do CO é de 7.07 km. No entanto com a adição da localização, o mercado passa a ter potenciais 18050 clientes. Supondo distribuições gaussianas para ambas as regiões, a **Figura 133** representa uma hipótese para a distribuição dos potenciais clientes, apenas considerando as referidas áreas.

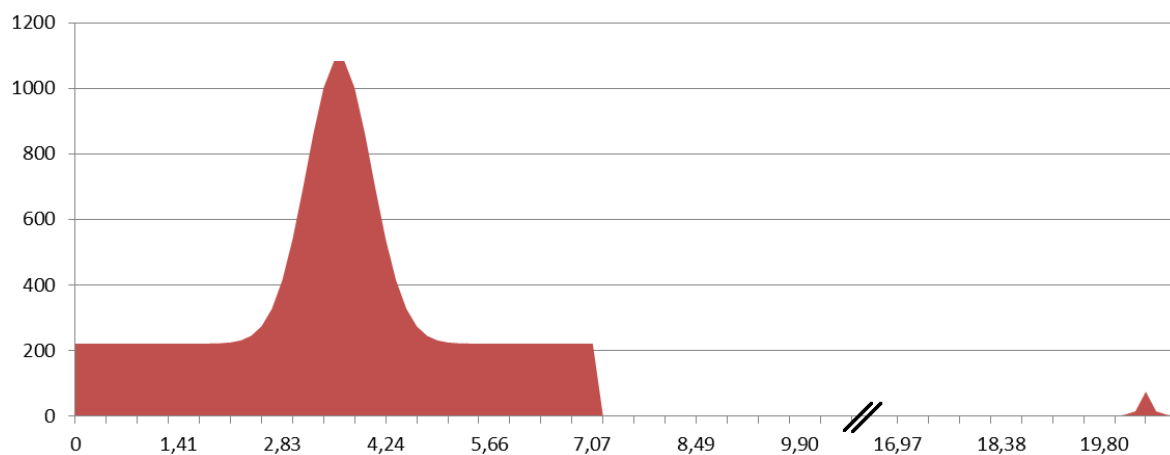


Figura 133 – Representação da distribuição da população para ambas as áreas.

Esta distribuição resulta da adição de duas funções gaussianas, uma função com $L \in [0; 7,07]$ e outra com $L \in [20; 20 + \sqrt{2}]$, onde todos os outros pontos tomam valores nulos, pois representam regiões não inseridas na rede.

A função representada anteriormente, não poderá ser representada por nenhum modelo geométrico descrito neste documento, mostrando a inflexibilidade dos mesmos para casos mais complexos.

5.5.2 Mercado

O mercado e sua adesão ao serviço deste operador serão em tudo idênticos aos apresentados na **Secção 5.3.2** - 18000 unidades habitacionais e uma penetração optimista, com excepção da adesão de 50 novos clientes empresariais no terceiro ano do exercício económico.

Tabela 96 – Número de clientes para os 10 anos de estudo económico, já com a adição de 50 novos clientes empresariais no 3º ano.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1854	2036	2832	5193	9061	11571	12389	12591	12637	12648

5.5.3 Material e Custos

Se os custos da zona urbana de Aveiro estão detalhadamente apresentados na configuração A, os custos da zona remota terão que ser calculados e adicionados aos resultados já obtidos.

Como o objectivo é dotar a zona de condições imediatas para todas as 50 empresas, o custo do equipamento considerado é o valor do mesmo para o ano de investimento (ano 3). Assim, e considerando os rácios já definidos anteriormente (**Figura 131**), apresenta-se todo o equipamento adicional necessário:

Tabela 97 – Equipamento necessário para servir localização remota.

Item	Quantidade	Custo unitário	Custo total
<i>Splitters 1:4</i>	13	79€	1027€
<i>Splitters 1:8</i>	2	117€	234€
<i>Cabo feeder 48FO</i>	20km	1027€/km	20540€
<i>Cabo distribution 48FO</i>	$0,8 \times \sqrt{2}/2 \times 2$ (km)	1027€/km	1162€
<i>Cabo drop 48FO</i>	$0,2 \times \sqrt{2}/2 \times 13$ (km)	1027€/km	290€
TOTAL = 21983€			

Também em relação às receitas, existe alguma modificação, uma vez que será considerado um custo superior para o segmento empresarial no valor de 1100€ anuais com uma taxa de erosão de 7% ao ano.

5.5.4 CAPEX

Para a elaboração do CAPEX, para esta configuração, foi considerado um $\rho = 0,8$, população com uma distribuição gaussiana e uma penetração optimista, tal como apresentado na **Secção 5.3.4**. Esses valores são descritos nas tabelas seguintes, e aos quais também adicionados os custos da ligação remota.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 98 - Custo total de ONU (C_{ONU}), fibra (C_f), splitters (C_s), OLT (C_{OLT}) e custo da ligação remota (C_{extra}).

213.210 €	233.413 €	313.351 €	557.564 €	943.773 €	1.185.694 €	1.261.801 €	1.279.943 €	1.283.931 €	1.284.852 €
134.020 €	146.022 €	192.029 €	358.053 €	618.092 €	776.115 €	844.126 €	856.127 €	860.128 €	860.128 €
20.880 €	22.893 €	30.082 €	51.635 €	84.475 €	104.455 €	110.348 €	111.666 €	112.076 €	112.076 €
100.000 €	100.000 €	100.000 €	200.000 €	300.000 €	300.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €	400.000 €
- €	- €	21.983 €	21.983 €	21.983 €	21.983 €	21.983 €	21.983 €	21.983 €	21.983 €

Tabela 99 - Investimento anual dos itens 1, 2 e 3, e investimento extra no ano 2.

213.210 €	20.203 €	79.938 €	244.213 €	386.209 €	241.922 €	76.107 €	18.142 €	3.988 €	921 €
154.900 €	14.014 €	53.196 €	187.578 €	292.879 €	178.004 €	73.903 €	13.320 €	4.410 €	- €
100.000 €	- €	- €	100.000 €	100.000 €	- €	100.000 €	- €	- €	- €
- €	- €	21.983 €	- €	- €	- €	- €	- €	- €	- €

Tabela 100 - Investimento anual, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado.

468.110 €	34.218 €	155.117 €	531.791 €	801.071 €	419.926 €	271.993 €	31.462 €	30.381 €	921 €
468.110 €	502.328 €	657.444 €	1.189.235 €	1.990.306 €	2.410.231 €	2.682.224 €	2.713.686 €	2.744.068 €	2.744.988 €
468.110 €	455.517 €	565.082 €	1.040.364 €	1.737.398 €	1.983.584 €	2.057.218 €	1.882.959 €	1.725.044 €	1.553.460 €

Da análise das tabelas anteriores e do gráfico da **Figura 134**, observam-se os baixos custos da localização remota, relativamente à zona urbana. Tal facto deve-se à baixa quantidade de clientes a servir. Posteriormente neste documento, será feita uma análise à variação dos custos da rede com aumento do comprimento da ligação extra e do número de clientes nessa localização.

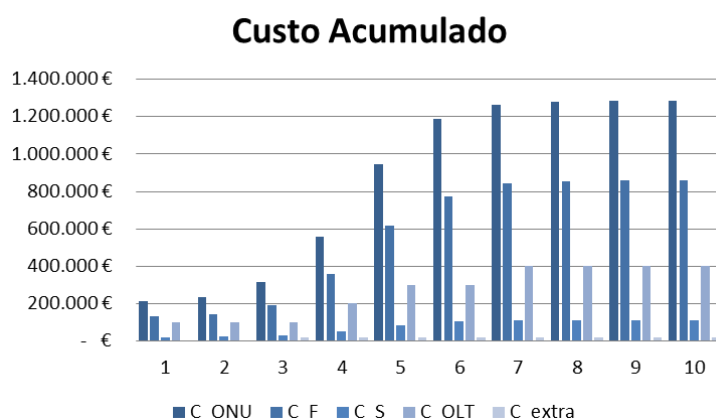


Figura 134 – Diferentes investimentos a considerar.

5.5.4.1 Investimento Faseado

Partindo do princípio que se conhecem os valores do CAPEX para o caso de um investimento contínuo, seguindo o ritmo de adesão ao serviço, podem-se agora considerar os valores do CAPEX para o caso de investimento faseado, cenário mais realista e próximo da política de investimento dos operadores. Serão estes valores que entram no apuramento de resultados. O aumento do número de clientes não é suficiente para alterar significativamente os custos de investimento, tal como se observa pelas tabelas seguintes.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 101 – Percentagem de clientes servidos, clientes passados e margem percentual de mercado, para uma abordagem “optimista”, ao longo dos 10 anos de estudo económico.

10%	11%	15%	29%	50%	64%	69%	70%	70%	70%
20%	20%	30%	30%	60%	75%	75%	75%	75%	75%
10%	9%	15%	1%	10%	11%	6%	5%	5%	5%

Tabela 102- Investimento faseado anual e investimento faseado acumulado e investimento faseado acumulado e depreciado, para uma abordagem “optimista”.

1.192.949 €	- €	1.541.198 €	- €	1.792.949 €	1.930.590 €	- €	- €	- €	- €
1.192.949 €	1.192.949 €	2.734.146 €	2.734.146 €	4.527.096 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €	6.457.686 €
1.192.949 €	1.073.654 €	2.507.486 €	2.256.738 €	3.824.013 €	5.372.202 €	4.834.982 €	4.351.483 €	3.916.335 €	3.524.702 €

A mesma análise feita na **Secção 5.3.4.3** no que toca ao ponto de menor margem. Sabendo que o mercado é o mesmo da análise feita na configuração A, a percentagem de casa passadas segue também a mesma linha de ideias em relação aos pontos de investimento. Devido à baixa

alteração do investimento, a **Figura 93** e a **Figura 94** mantêm-se actualizadas para os valores tabelados anteriormente.

5.5.5 OPEX

No que toca a custos operacionais, as alterações serão mínimas, uma vez que este indicador está dependente do investimento faseado acumulado e do número de clientes.

A **Tabela 103** mostra o número de utilizadores e o custo do OPEX anual, para as três situações de penetração de mercado, e o gráfico da **Figura 99** faz o comparativo do OPEX das referidas situações.

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 103 – OPEX ao longo dos 10 anos do estudo económico.

274.713 €	296.553 €	462.764 €	746.084 €	1.290.152 €	1.678.072 €	1.776.232 €	1.800.472 €	1.805.992 €	1.807.312 €
-----------	-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

5.5.6 Receitas

Devido ao facto de ter sido adicionado um novo serviço para o segmento empresarial, as receitas desta configuração sofrem alguma alteração, ainda que seja mínima a quantidade de clientes nesses segmentos. A **Tabela 104** mostra a tarifa anual do serviço para o segmento empresarial, onde a taxa de erosão é de 7%.

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 104 – Tarifa anual do serviço do segmento empresarial.

1.100 €	1.023 €	951 €	885 €	823 €	765 €	712 €	662 €	616 €	572 €
---------	---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Assim as receitas para todos os clientes estão representadas na tabela seguinte, onde já foram adicionados os 50 clientes do segmento empresarial, presentes a partir do ano 3.

Tabela 105 – Tarifa anual do serviço do segmento empresarial.

1.019.700 €	1.063.810 €	1.428.485 €	2.469.453 €	4.077.877 €	4.941.364 €	5.024.249 €	4.849.910 €	4.623.537 €	4.395.558 €
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

5.5.7 Resultados

Por causa do baixo aumento dos custos de implementação da rede, todos os critérios de avaliação da viabilidade deste projecto sofrem uma alteração praticamente nula, como tal serão considerados validos os resultados da **Secção 5.4.6** para uma penetração optimista.

5.5.8 Análise de Sensibilidade

À partida poder-se-á retirar a conclusão, de que esta solução apresenta-se mais viável em comparação com a opção de criar um *central office* na localização remota, devido ao insignificante aumento dos custos. Outra conclusão, que se pode retirar, é a viabilidade económica desta solução visto que, utilizando a nova tarifa (951€, para o 3º ano de estudo económico), o tempo de retorno deste projecto extraordinário será inferior a um ano (as receitas provenientes da zona industrial são de 47570€ no ano 3).

De facto, toda esta alteração mínima dos custos deve-se ao facto da baixa percentagem dos custos da localização remota em relação ao total da rede. Apresenta-se de seguida uma reflexão sobre a sensibilidade do custo por casa, servida em função do aumento do número de clientes na localização remota. Será analisado um número de clientes empresariais no intervalo de [50; 4000], pois a partir de um valor próximo dos 4096 clientes será mais vantajoso para o operador, instalar um *central office* com OLT na zona industrial, evitando os elevados custos de levar a rede até a essa localização.

Sensibilidade do custo por casa servida em função do número de clientes remotos

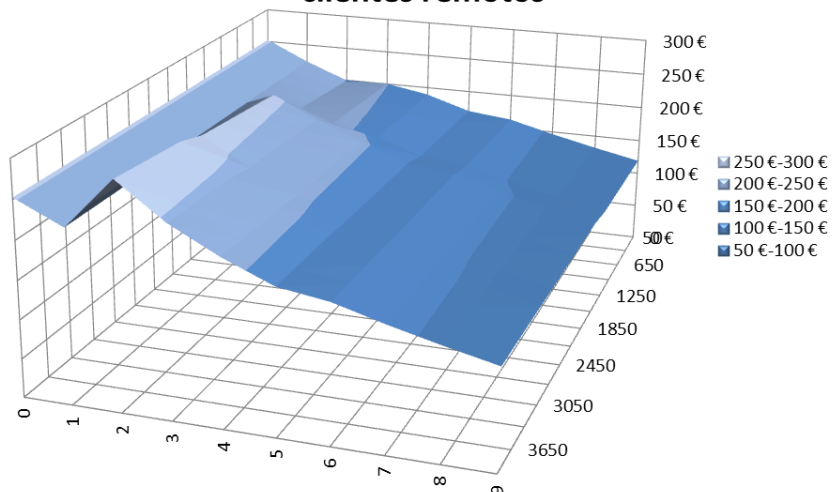


Figura 135 – Análise à sensibilidade do custo por casa servida em função do aumento do número de clientes na localização remota.

Examinando a imagem, observa-se um pico de investimento, quando o número de clientes da localização remota exige ao operador a instalação de um novo OLT, pois os existentes não têm capacidade para servir ambas as localizações. Este indicador poderá transmitir que não será positivo exceder certo número de clientes na localização remota, pois aumentará bastante os custos da rede e não trará necessariamente o retorno necessário, para compensar esse investimento.

Também se torna importante investigar a variação do custo por casa servida, em função do aumento de L_{extra} . Será estudado esse parâmetro entre [5; 65], onde o limite superior é dado pelo *link budget*.

Sensibilidade do custo por casa servida em função de L_{extra}

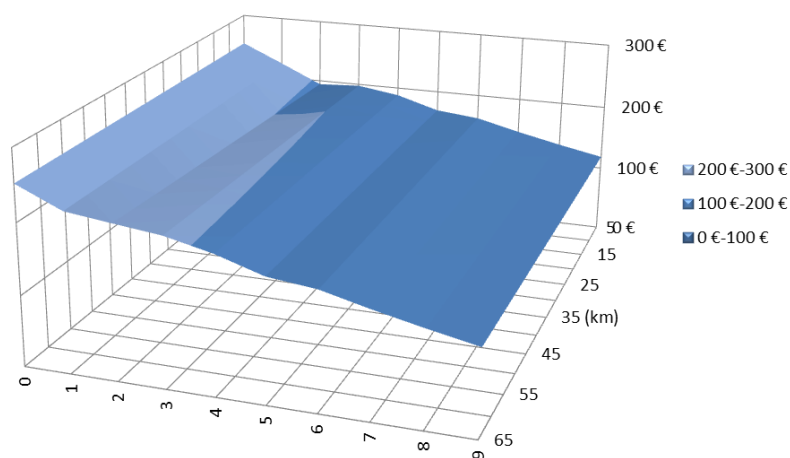


Figura 136 – Análise à sensibilidade do custo por casa servida em função do aumento da distância da localização remota.

Tanto na **Figura 135** como na **Figura 136**, nota-se que não é tão evidente o decréscimo do custo de casa servida, com o aumento do número de clientes empresariais e a diminuição da distância, principalmente nesta segunda. Novamente, o facto do custo da rede urbana ser uma elevada percentagem do investimento total, poderá justificar essa baixa descida.

5.6 Configuração D – Opções de Infra-estrutura

Para este cenário foi considerada a inexistência de infra-estruturas, como tal a construção das mesmas tem que ser tida em conta. O método mais convencional envolve a construção de uma rede de condutas que facilita a posterior instalação de cablagem através de diferentes técnicas (puxamento, soprimento ou flutuação).

Serão assim analisados os aumentos de custos de investimento para os cenários descritos nas **Seções 5.3** e **5.5**, mas englobando agora várias opções de criação de infra-estruturas:

- 1 degrau de *splitting* (configuração A) – comparação entre o uso de uma rede de condutas e outra de valas, utilizando caixas de visita de grande dimensão nos pontos de flexibilidade;
- 1 degrau de *splitting* na região urbana e 2 degraus de *splitting* na localização remota (configuração C) – uso de uma rede de condutas na localização principal, utilizando caixas de visita de grande dimensão nos pontos de flexibilidade. Para localização remota é construída uma vala para o cabo *feeder*, e valas dentro da mesma com o recurso a caixas de visita de superfície. Poderiam ser utilizados postes para passagem da fibra, no entanto esse custo seria extremamente reduzido, visto que a instalação de postes já é generalizada e não obrigaria a grande custo por parte do operador.

Um ponto que merece destaque é o facto de a utilização de valas não permitir a intervenção posterior o que conduz à necessidade de abrir outra vala para fazer a passagem dos cabos de fibra óptica (mesmo que seja na mesma localização), caso o operador tenha necessidade instalar mais cablagem. Tal já não se verifica nas redes de condutas, onde a adição de nova cablagem pode ser feita por técnicas de puxamento, sopramento ou flutuação.

Observando todos estas configurações, com a inclusão dos custos de infra-estruturas, revelam cenários mais reais pois, na maioria das situações, os custos com criação das infra-estruturas terão que ser considerados.

São poucos os operadores que possuem a totalidade das camadas da rede (equipamento activo, equipamento passivo e serviços vocacionados ao cliente. Atente-se à seguinte figura.

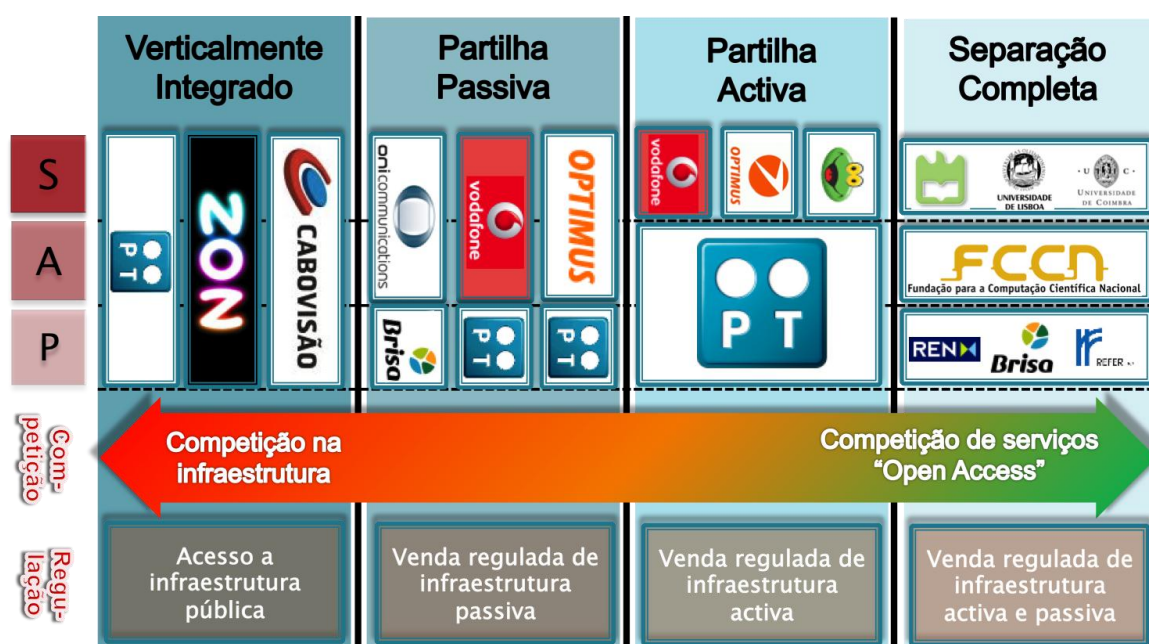


Figura 137 - Modelos de negócio de banda larga fixa, para o caso português.

Observe-se que apenas os principais operadores de comunicações nacionais cobrem a totalidade das camadas da rede, a estes dá-se o nome de verticalmente integrados. Veja-se também os casos onde existe partilha da infra-estrutura passiva (valas, condutas e postes) entre vários operadores. Este caso de partilha passiva revela-se interessante no que toca ao menor investimento que necessita. Também no caso de partilha activa, há diminuição dos custos da rede, nomeadamente ao nível de equipamento OLT. Tanto no caso de partilha activa como passiva a sintonia entre os intervenientes, terá que ser grande, algo que nem sempre é possível, devido ao conflito de interesses, pois na maioria dos casos o negócio é feito entre operadores que competem pelo mesmo mercado.

Cada operador tem o seu modelo de negócio, sendo que também pode variar de região para região.

5.6.1 Configuração A com condutas

A opção de utilização de condutas poderá não ser, à partida, a opção mais económica, mas pode revelar-se de grande utilidade para o operador a criação de uma rede de condutas, principalmente em zonas urbanas. Com a rede de condutas construída, o operador pode realizar intervenções ao equipamento instalado de forma mais económica, tendo acesso mais fácil e rápido ao mesmo. O investimento para a criação deste tipo de infra-estrutura é, de facto, o mais elevado entre as opções aqui apresentadas, mas tal investimento terá o seu retorno a longo prazo.

A tabela seguinte mostra a adição aos custos da rede com a opção de implementar condutas.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 106 – Custo das infra-estruturas.

927.588 €	1.002.949 €	1.291.192 €	2.419.159 €	4.136.814 €	5.127.611 €	5.640.887 €	5.716.248 €	5.741.252 €	5.741.252 €
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 107 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma rede de condutas.

1.395.698 €	109.579 €	421.376 €	1.659.758 €	2.496.742 €	1.410.723 €	763.286 €	106.823 €	33.402 €	921 €
1.395.698 €	1.505.277 €	1.926.653 €	3.586.411 €	6.083.153 €	7.493.876 €	8.257.161 €	8.363.984 €	8.397.386 €	8.398.307 €
1.395.698 €	1.365.707 €	1.650.512 €	3.145.219 €	5.327.439 €	6.205.418 €	6.348.162 €	5.820.169 €	5.271.554 €	4.745.319 €

Poderá ser feito o confronto da mesma configuração com e sem a implementação de infra-estruturas (condutas). Essa comparação é exibida no gráfico da **Figura 138**.

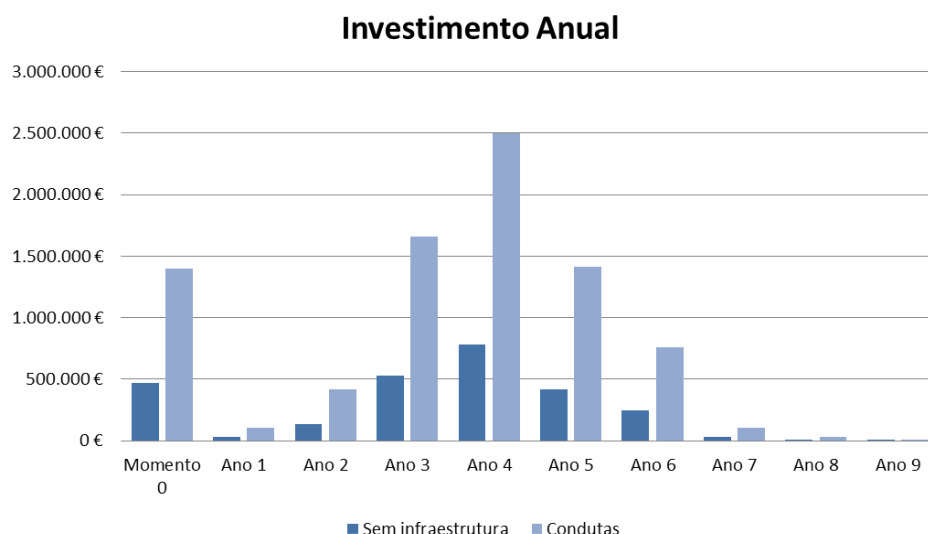


Figura 138 – Comparação do investimento anual entre a configuração A com e sem a implementação de uma rede de condutas

Analisando a figura anterior, observa-se que o investimento anual, de modo geral, triplica e, relação à mesma configuração sem a implementação de infra-estruturas.

O procedimento a realizar para o investimento faseado, é o mesmo que o apresentado na **Secção 5.4.4.3**. Quanto à OPEX e receitas, os valores mantêm-se inalterados, relativamente às **Secções 5.3.5** e **5.3.6**.

Conhecendo os valores de CAPEX, OPEX e receitas poder-se-ão apurar os resultados, no sentido de aferir as diferenças dos indicadores económicos com a adição dos custos de infra-estrutura (neste caso uma rede de condutas).

Recorrendo às ferramentas do Microsoft Excel e às equações da **Secção 5.1.3.4**, foi possível calcular facilmente os resultados deste exercício económico: fluxo líquido anual, balanço, VAL, TIR, tempo de recuperação do investimento e custo por casa passada / servida.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 108 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.

-1.525.277 €	0 €	-2.101.134 €	0 €	-2.516.742 €	-2.335.154 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-1.525.277 €	-1.525.277 €	-3.626.411 €	-3.626.411 €	-6.143.153 €	-8.478.307 €	-8.478.307 €	-8.478.307 €	-8.478.307 €	-8.478.307 €	-8.478.307 €
0 €	-374.949 €	-396.819 €	-696.480 €	-979.771 €	-1.695.598 €	-2.230.275 €	-2.328.489 €	-2.352.703 €	-2.358.234 €	-2.359.474 €
0 €	1.019.433 €	1.063.687 €	1.380.909 €	2.425.094 €	4.036.595 €	4.902.833 €	4.988.591 €	4.816.665 €	4.592.647 €	4.366.598 €
0 €	644.483 €	666.868 €	684.430 €	1.445.323 €	2.340.997 €	2.672.558 €	2.660.102 €	2.463.962 €	2.234.414 €	2.007.124 €
0 €	644.483 €	1.311.351 €	1.995.781 €	3.441.104 €	5.782.101 €	8.454.660 €	11.114.762 €	13.578.723 €	15.813.137 €	17.820.261 €
-1.525.277 €	-880.793 €	-2.315.060 €	-1.630.630 €	-2.702.049 €	-2.696.206 €	-23.647 €	2.636.455 €	5.100.416 €	7.334.830 €	9.341.954 €

Tabela 109 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.

VAL	5.298.436 €
TIR	12,68%
Tempo de Recuperação	8

Tabela 110 – Custo por casa servida e custo por casa passada.

753 €	671 €	593 €	612 €	591 €	539 €	514 €	464 €	419 €	377 €
823 €	674 €	1.199 €	584 €	579 €	610 €	513 €	454 €	407 €	366 €

Atentando aos resultados obtidos, cedo se verifica que os indicadores não se encontram tão positivos como anteriormente. O tempo de recuperação sobe para 8 anos e o VAL e a TIR descem bastante, mantendo-se, contudo, a níveis positivos. O custo por casa passada e servida (**Figura 139**) duplica na maioria dos anos.

Custo por Casa Servida e Passada

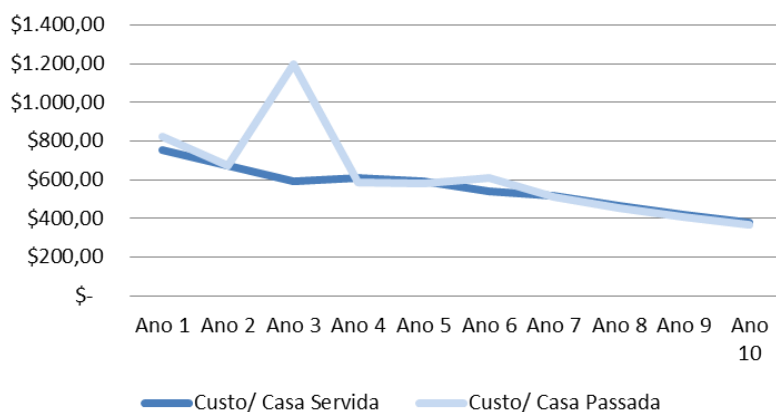


Figura 139 - Custo por casa servida e passada, com a inclusão dos custos de infra-estruturas.

Resultados

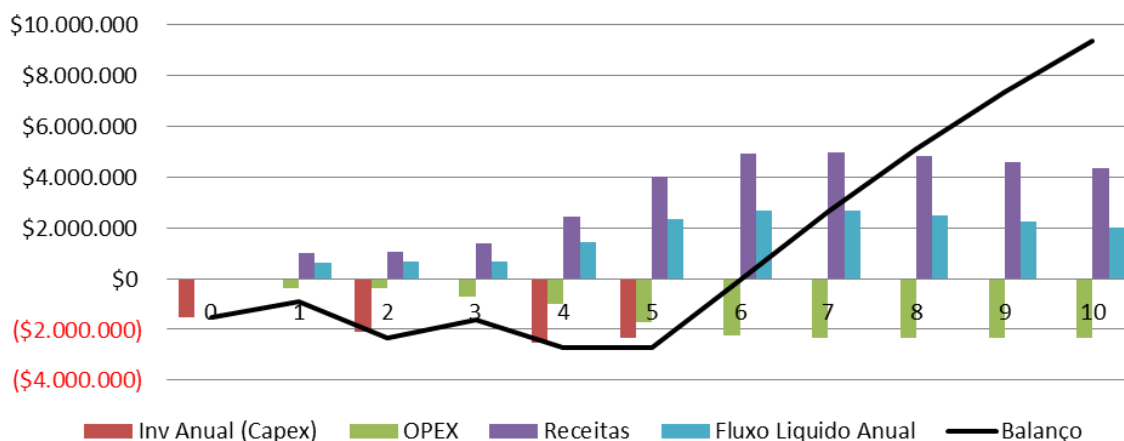


Figura 140 – Resultados do projecto de investimento ao longo de 10 anos, com a inclusão dos custos de infra-estruturas.

5.6.2 Configuração A com valas

O uso de condutas poderá ser, de facto, a melhor opção em certas situações, mesmo tendo o seu retorno a longo prazo. O que acontece é que nem sempre é possível realizar concretizar esta opção, seja por razões políticas, por impossibilidade do local ou qualquer outro motivo. Nesse caso é apresentado o cenário com o uso de valas, que além de ostentarem menor dimensão que as condutas, necessitam de um investimento inferior.

Vejam-se agora os valores do investimento necessário com adição aos custos da rede e com a opção de implementar valas, ao invés de condutas.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 111 – Custo das infra-estruturas.

580.036 €	632.894 €	834.874 €	1.555.280 €	2.689.098 €	3.383.601 €	3.673.094 €	3.725.952 €	3.743.454 €	3.743.454 €
-----------	-----------	-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 112 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma rede de condutas.

1.048.146 €	87.076 €	335.113 €	1.252.197 €	1.912.905 €	1.114.429 €	539.502 €	84.320 €	25.901 €	921 €
1.048.146 €	1.135.222 €	1.470.335 €	2.722.532 €	4.635.438 €	5.749.866 €	6.289.368 €	6.373.688 €	6.399.589 €	6.400.510 €
1.048.146 €	1.030.407 €	1.262.480 €	2.388.429 €	4.062.491 €	4.770.671 €	4.833.106 €	4.434.115 €	4.016.605 €	3.615.865 €

Poderá ser feito o confronto da mesma configuração com e sem a implementação de infra-estruturas (valas). Essa comparação exibe-se no gráfico da **Figura 141**.

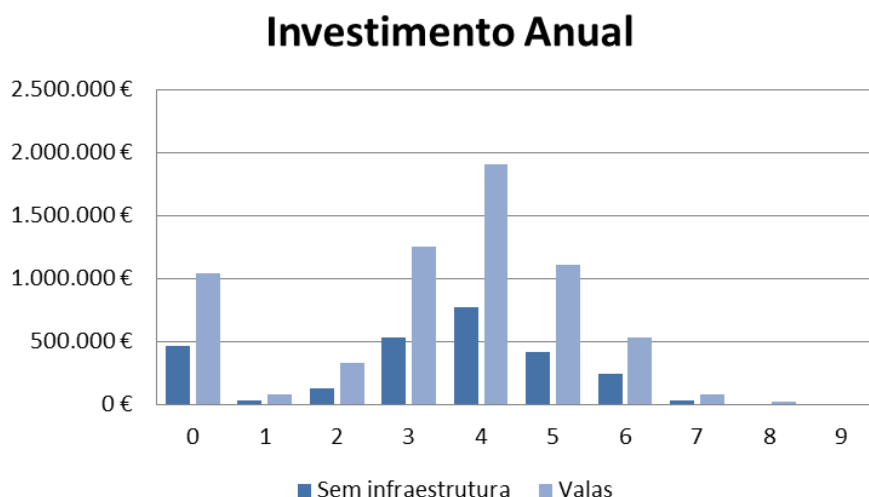


Figura 141 – Comparação do investimento anual entre a configuração A com e sem a implementação de valas.

Estudando a figura anterior, observa-se que o investimento anual, sendo inferior ao da implementação de condutas, é bastante superior em relação à mesma configuração sem a implementação de infra-estruturas.

O procedimento a realizar para o investimento faseado, será o mesmo que o apresentado na **Secção 5.4.4.3**. Quanto a OPEX e receitas os valores mantêm-se inalterados, relativamente às **Secções 5.3.5 e 5.3.6**.

Conhecendo os valores de CAPEX, OPEX e receitas, poder-se-ão apurar resultados, no sentido de aferir as diferenças dos indicadores económicos com a adição dos custos de infra-estrutura (neste caso uma rede de condutas).

Recorrendo às ferramentas do Microsoft Excel e às equações da **Secção 5.1.3.4**, foi possível calcular facilmente os resultados deste exercício económico: fluxo líquido anual, balanço, VAL, TIR, tempo de recuperação do investimento e custo por casa passada / servida.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 113 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.

-1.155.222 €	0 €	-1.607.311 €	0 €	-1.932.905 €	-1.785.072 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-1.155.222 €	-1.155.222 €	-2.762.532 €	-2.762.532 €	-4.695.438 €	-6.480.510 €	-6.480.510 €	-6.480.510 €	-6.480.510 €	-6.480.510 €	-6.480.510 €
0 €	-337.944 €	-359.814 €	-610.092 €	-893.383 €	-1.550.827 €	-2.030.495 €	-2.128.709 €	-2.152.924 €	-2.158.454 €	-2.159.694 €
0 €	1.019.433 €	1.063.687 €	1.380.909 €	2.425.094 €	4.036.595 €	4.902.833 €	4.988.591 €	4.816.665 €	4.592.647 €	4.366.598 €
0 €	681.489 €	703.873 €	770.818 €	1.531.711 €	2.485.769 €	2.872.338 €	2.859.882 €	2.663.742 €	2.434.193 €	2.206.904 €
0 €	681.489 €	1.385.362 €	2.156.179 €	3.687.891 €	6.173.659 €	9.045.997 €	11.905.879 €	14.569.621 €	17.003.814 €	19.210.718 €
-1.155.222 €	-473.733 €	-1.377.170 €	-606.353 €	-1.007.547 €	-306.850 €	2.565.488 €	5.425.369 €	8.089.111 €	10.523.304 €	12.730.208 €

Tabela 114 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.

VAL	20.376.330 €
TIR	36,88%
Tempo de Recuperação	7

Tabela 115 – Custo por casa servida e custo por casa passada.

565 €	506 €	454 €	464 €	451 €	414 €	392 €	354 €	319 €	287 €
623 €	511 €	914 €	445 €	443 €	467 €	392 €	347 €	312 €	280 €

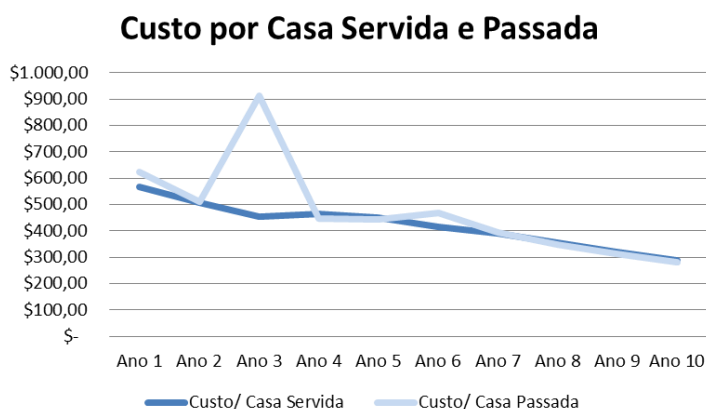


Figura 142 – Custo por casa servida e passada.

Dos valores apresentados previamente infere-se que este cenário apresenta melhores resultados que para o caso do uso de condutas. O *payback* reduz 1 ano e a VAL e TIR aumentam, sem nunca chegar aos valores alcançados sem a criação de infra-estruturas. O custo por casa servida apresenta naturalmente um pico no Ano 3, resultante do forte investimento realizado nesse ano, e é em todo o período superior ao mesmo indicador para a configuração A. O balanço apresenta-se positivo a partir do ano 5, sendo que a partir desse mesmo ano entra em forte crescimento (**Figura 128**).

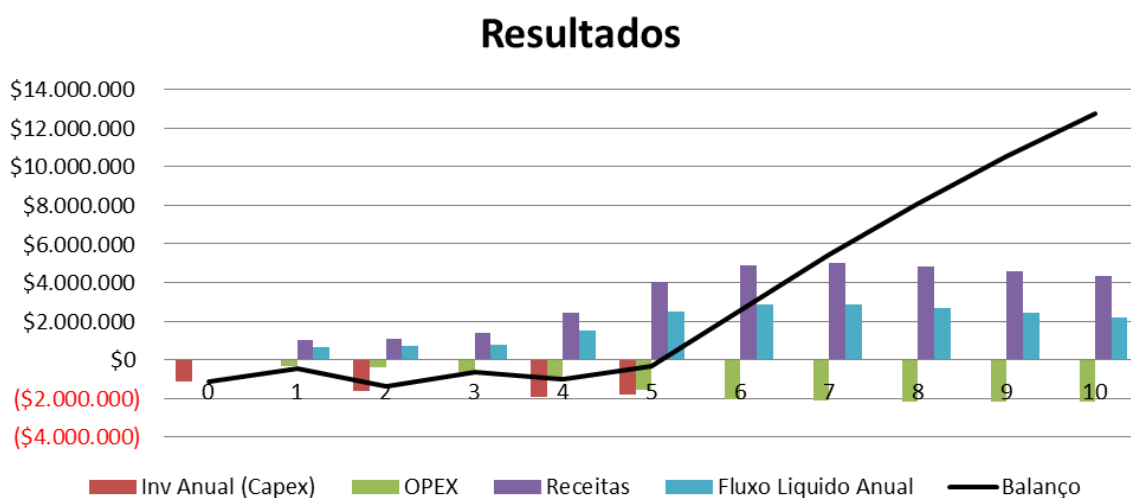


Figura 143 – Resultados do exercício económico, para uma configuração com um degrau de splitting e implementação de valas para passagem da cablagem.

5.6.3 Configuração C com condutas e valas

Para esta configuração usa-se a solução mista com a implementação de uma rede de condutas na região urbana, e criação de valas até à localização remota. Será natural o aumento dos custos para servir a localização remota, visto que por poucos clientes que sejam, a cablagem tem que ser passada e as valas abertas. Seria interessante fazer um estudo do L_{extra} mínimo que

poderia ser considerado (com a inclusão da concepção de vários tipos de infra-estruturas), para que o operador colocasse a hipótese de criar uma outra rede de acesso na localização remota, ao invés de levar um cabo feeder da rede urbana.

São, finalmente apresentadas as tabelas referentes à diferença de investimento em comparação com o mesmo cenário, mas sem a implementação de infra-estruturas (**Figura 144**)

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabela 116 – Custo das infra-estruturas.

927.588 €	1.002.949 €	1.641.192 €	2.769.159 €	4.486.814 €	5.477.611 €	5.990.887 €	6.066.248 €	6.091.252 €	6.091.252 €
-----------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Tabela 117 - Investimento anual dos três itens, investimento acumulado e investimento acumulado depreciado, com o uso de uma combinação de condutas e valas.

1.395.698 €	109.579 €	793.359 €	1.659.758 €	2.496.742 €	1.410.723 €	763.286 €	106.823 €	33.402 €	921 €
1.395.698 €	1.505.277 €	2.298.636 €	3.958.394 €	6.455.136 €	7.865.859 €	8.629.144 €	8.735.968 €	8.769.370 €	8.770.290 €
1.395.698 €	1.365.707 €	2.022.496 €	3.480.004 €	5.628.746 €	6.476.594 €	6.592.220 €	6.039.821 €	5.469.241 €	4.923.238 €

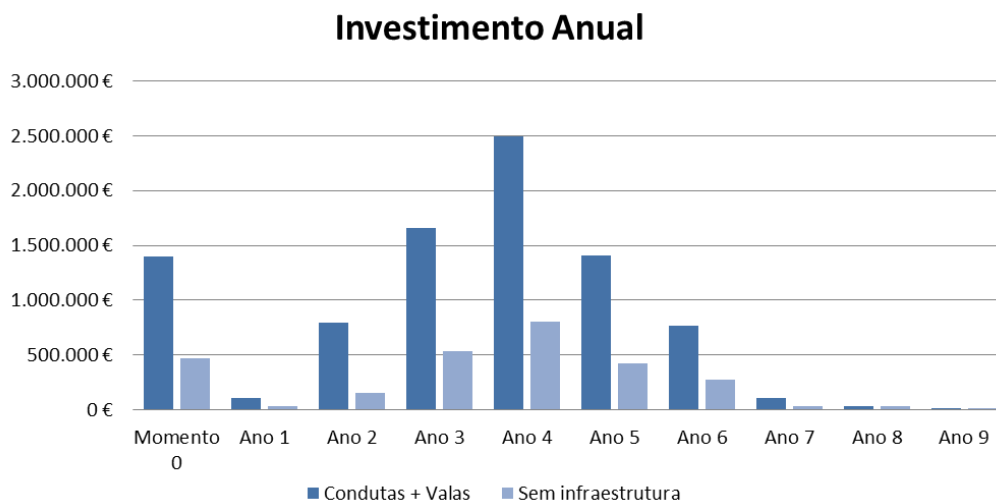


Figura 144 – Comparação entre o cenário com implementação de infra-estruturas e sem criação das mesmas.

Observa-se que o aumento de custos é da ordem dos 300% para todos os anos, exequptuando no ano 2, onde o aumento é superior a 500%. Isto deve-se ao facto de neste ano serem criadas as infra-estruturas e a rede na localização remota.

Os resultados para este cenário, não serão obviamente tão positivos como todos os outros, pois os custos da infra-estrutura, que será necessário criar, para levar a rede a localização remota são elevados para o retorno que trarão. Os resultados são apresentados nas tabelas seguintes.

Momento 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020

Tabela 118 – Investimento anual, Investimento anual acumulado, OPEX, Receitas, fluxo líquido anual, fluxo líquido anual acumulado e balanço ao longo dos 10 anos do estudo económico e “Momento 0”, com a adição dos custos de infra-estruturas.

-1.525.277 €	0 €	-2.473.117 €	0 €	-2.516.742 €	-2.335.154 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
-1.525.277 €	-1.525.277 €	-3.998.394 €	-3.998.394 €	-6.515.136 €	-8.850.290 €	-8.850.290 €	-8.850.290 €	-8.850.290 €	-8.850.290 €	-8.850.290 €
0 €	-375.008 €	-396.848 €	-739.679 €	-1.022.999 €	-1.738.834 €	-2.273.549 €	-2.371.709 €	-2.395.949 €	-2.401.469 €	-2.402.789 €
0 €	1.019.700 €	1.063.810 €	1.428.485 €	2.469.453 €	4.077.877 €	4.941.364 €	5.024.249 €	4.849.910 €	4.623.537 €	4.395.558 €
0 €	644.692 €	666.962 €	688.805 €	1.446.454 €	2.339.043 €	2.667.815 €	2.652.540 €	2.453.961 €	2.222.068 €	1.992.769 €
0 €	644.692 €	1.311.655 €	2.000.460 €	3.446.914 €	5.785.957 €	8.453.772 €	11.106.312 €	13.560.273 €	15.782.341 €	17.775.110 €
-1.525.277 €	-880.584 €	-2.686.739 €	-1.997.934 €	-3.068.222 €	-3.064.333 €	-396.518 €	2.256.022 €	4.709.983 €	6.932.051 €	8.924.820 €

Tabela 119 – VAL, TIR e Tempo de Recuperação.

VAL	2.848.443 €
TIR	9,04%
Tempo de Recuperação	8

Tabela 120 – Custo por casa servida e custo por casa passada.

753 €	671 €	714 €	670 €	621 €	560 €	532 €	480 €	433 €	389 €
823 €	674 €	1.310 €	643 €	609 €	631 €	531 €	470 €	421 €	379 €

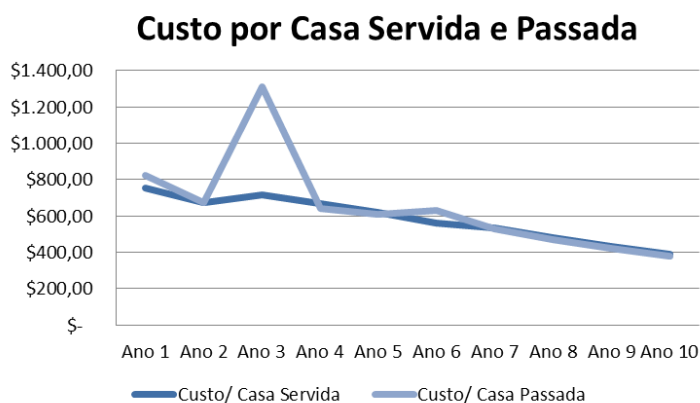


Figura 145 – Custo por casa servida e passada.

O custo por casa passada tem um pico bastante elevado pois, para além de ser o momento onde existe um forte investimento na rede urbana, também nesse período é feito o total de investimentos necessários para a localização remota. O balanço apresenta-se positivo a partir do ano 7, sendo que a partir desse ano 5 entra em forte crescimento, ainda que negativo (**Figura 128**).

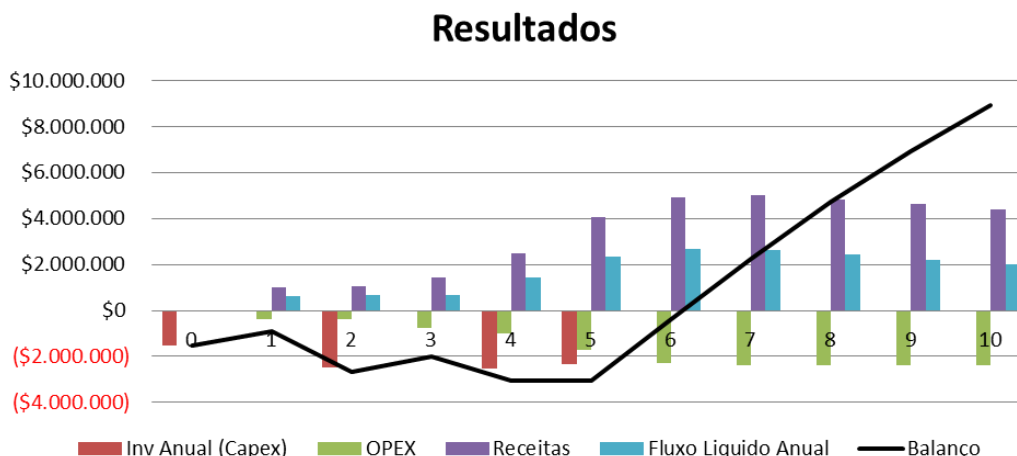


Figura 146 – Resultados do exercício económico, para uma configuração com um degrau de *splitting* e implementação de valas para passagem da cablagem.

Tal como seria de esperar, e observando os resultados das análises anteriores, conclui-se que efectivamente o aumento de custos é muito significativo e terá que ser levado fortemente em conta.

5.7 Conclusões

Foram diversas as características da rede aqui analisadas e todas surtem alterações nos custos de implementação da rede. As variações dos valores de saída em relação às diferentes combinações de parâmetros de entrada, estão sucintamente resumidos no seguinte esquema, em função a um caso de penetração de mercado optimista, de distribuição populacional normal com um degrau de *splitting* e de $\rho = 0,8$:

Parâmetros de Entrada \ Parâmetros de Saída		Investimento em Equipamento							Resultados				
		< L >	OLT	Fibra	Splitters	ONU	OPEX	Receitas	Fluxo Líquido Anual	VAL	TIR	Payback	Custo por casa servida
Penetração de Mercado	Optimista	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mediana	→	↘	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
	Pessimista	→	↘	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑
ρ	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,5	→	→	↑	→	→	↑	→	↓	↓	↓	↑	↑
	0,2	→	→	↑	→	→	↑	→	↓	↓	↓	↑	↑
Distribuição Populacional	Gaussiana	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Uniforme	↓	→	↓	→	→	↓	→	↑	↑	↑	↓	↓
	Próxima do CO	↓	→	↓	→	→	↓	→	↑	↑	↑	↓	↓
Nº degraus Splitting	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	→	→	↑	↑	→	↑	→	↓	↓	↓	↑	↑
	Infraestruturas	→	→	→	→	→	↑	→	↓	↓	↓	↑	↑

Figura 147 – Tabela comparativa das variações dos parâmetros de saída em função da variação dos diferentes parâmetros de entrada.

- As penetrações “mediana” e “pessimista” exibem piores resultados (em comparação com a optimista), devido ao pior volume de receitas que geram, apesar do menor investimento que requerem. Esse menor investimento deve-se à queda do valor do equipamento ao longo dos anos, e como o mercado tem uma adesão mais tardia, o investimento poderá ser realizado mais tarde;
- A diminuição de ρ provoca um aumento do investimento em fibra óptica, devido ao facto de que a fibra da rede *feeder* usada, para ligar o *splitter* ao OLT, é partilhada pelo número de utilizadores que acede ao referido *splitter*. Quanto mais próximo estiver o ponto de flexibilidade do cliente, e maior for ρ , maior a quantidade de fibra partilhada, e consequentemente menor investimento requer. O aumento do investimento leva ao aumento do OPEX e a piores resultados;

- A distribuição populacional fará variar a distância média a que o cliente está do OLT. Das distribuições analisadas, a gaussiana é a que maior $\langle L \rangle$ apresentará, seguido da distribuição uniforme e por fim, a distribuição de poisson (onde a população se encontra próxima do CO). A diminuição da distância média OLT-ONU leva naturalmente à redução dos custos de implementação da rede;
- O aumento do número de degraus de splitting de 1 para 2 conduz aparentemente ao aumento dos custos da rede. No entanto, esse facto prende-se com o uso de cablagem excessiva em cada segmento da rede, aplicando a política de implementação de instalação de fibra escura. Isto verifica-se em maior abundância no caso de dois pontos de flexibilidade. No caso de futuro *upgrade* à rede, a opção de 2 degraus revelar-se-ia mais *future proof*, e os melhoramentos na rede quereriam um menor investimento em fibra óptica;
- As necessidades de criação de infra-estrutura, indispensável para a execução da rede, levam a uma necessidade de investimento na ordem dos 300% superior, em comparação com o caso em que a infra-estrutura já existe.

6. Considerações Finais

Passam a expor-se as principais conclusões acerca do trabalho efectuado. Apresentam-se também algumas sugestões de trabalho futuro que poderão dar continuidade a aspectos abordados nesta dissertação.

6.1 Conclusões

Esta dissertação debruçou-se sobre vários aspectos da engenharia e da análise técnico-económica das redes de acesso de nova geração.

Trata-se de uma problemática motivada pela importância que as redes de telecomunicações e as tecnologias de informação e comunicação, de um modo geral, assumiram no actual contexto da sociedade dos dias de hoje. De facto, recursos como TV ou Internet tornaram-se factores primordiais para o desenvolvimento económico, cultural e social dos países. Num momento em que se operam mudanças bastante significativas no mundo, nomeadamente a globalização da oferta e da procura, a generalização do uso destas tecnologias constitui hoje uma condicionante do desenvolvimento socioeconómico de uma região. A existência, a possibilidade de aceder, e a capacidade de saber utilizar estes recursos de nova geração, constituem factores determinantes para a criação de igualdade de oportunidades, para a melhoria de qualidade de vida e para o estímulo da economia. Os sistemas de informação associados a redes de telecomunicações, com adequado desempenho, são os ingredientes básicos para a disponibilização de novos serviços e para o aparecimento de inovações tecnológicas que permitem não só aumentar a capacidade de processamento de informações, como também elevar a produtividade, expandir negócios e agilizar as organizações.

Começando por fazer caracterização do estado da arte das tecnologias, pilar das redes de acesso actuais, procurou-se mostrar algumas das suas limitações e algumas perspectivas de evolução. Tais perspectivas levaram invariavelmente à conclusão da necessidade de elevados investimentos caracterizados por muitas incertezas e factores de risco. Por esta razão, tornou-se necessário adquirir familiarização com as técnicas de análise de projectos de investimento em redes de acesso.

Foi analisados vários modelos matemáticos, de modo a representar vários tipos de distribuição populacional numa área de análise, com vista a calcular uma distância média que a estação local do operador estará do assinante do serviço. Dando uso a essa distância, é possível obter cálculos médios para o custo da rede, e assim retirar conclusões quanto a viabilidade económica para o projecto de investimento. Foram várias as configurações analisadas, revelando cada uma delas detalhes concretos que tornam os seus resultados únicos. As variações dos

diversos parâmetros permitiram retirar elações que poderão assistir ao operador no momento de tomar decisões.

De forma complementar, esta dissertação teve também em vista contribuir para a disponibilização de materiais didácticos sobre os modelos matemáticos usados para o desenvolvimento das distribuições populacionais, apresentados em anexo.

Face ao exposto, é de concluir que, apesar de se terem criado ferramentas de cálculo de raiz, e de todas as dificuldades inerentes a este processo, os objectivos que nortearam a elaboração desta dissertação terão sido, na sua globalidade, atingidos com sucesso.

6.2 Trabalho Futuro

O objectivo desta dissertação foi a criação, desenvolvimento e análise de modelos matemáticos para a distribuição da população dentro de uma área específica, e posterior avaliação técnico-económica de redes de telecomunicações, para a área definida.

Em termos de trabalho futuro, existem vários aspectos que poderiam ser considerados, de modo a melhorar as ferramentas de cálculo usadas, nomeadamente:

- Adição de taxas de imposto para obter resultados mais detalhados;
- Considerar o tempo de vida do equipamento e o investimento para a sua substituição;
- Análise mais detalhada do equipamento a instalar e infra-estrutura, nomeadamente no interior do *central office*;
- Consideração de taxas como custos direitos de passagem e hipótese de aluguer de infra-estrutura a terceiros, concretamente a operadores incumbentes e verticalmente integrados;
- Estudo de outras opções de infra-estrutura: *microducts* e postes;
- Adicionar aos cálculos as infra-estruturas e a instalação dentro dos edifícios;
- Outros métodos de cálculo de investimento faseado, sem recorrer a opção da margem percentual;
- Análise de outros formatos geométricos da área de estudo: circular (Anexo B: Distância média entre o centro de um círculo e um ponto aleatório P contido no seu interior [21]) ou celular;
- Optimização da fibra escura por *splitter*, de modo a ter uma percentagem fixa de fibra escura para upgrades futuros consoante necessidades previstas;
- Estudo da metodologia de distribuição da população para áreas rurais (Anexo C: Metodologia para a classificação de áreas geográficas [21]);

- Estudo das opções de custo inerentes à aplicação de outras tecnologias especificamente tecnologias sem fios (WiMAX, LTE, 3G);
- Adição de vários tipos de serviço e estudo perfil socioeconómico, de modo a definir serviços concretos para zonas distintas com diferentes soluções tecnológicas;
- Definição dos serviços com base em largura de banda, tarifas e número de serviços, de modo a criar um vector de qualidade de acordo com a preferência dos utilizadores;
- Adição de aspectos de concorrência entre operadores e divisão de mercado.

7. Referências

- [1] Abreu, Jorge Trinidad Ferraz de, “Redes de TV por Cabo: situação actual e perspectivas de evolução”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, 1996, Universidade de Aveiro.
- [2] Amendola, G. B. e L. M. Pupillo, "*The Economics of Next Generation Access Networks and Regulatory Governance: Towards Geographic Patterns of Regulation*", 2008.
- [3] Araújo, Marco e A. Manuel de Oliveira Duarte, “*A Comparative Study on Cost/benefit Analysis of Fiber-to-the-Home Telecommunications Systems in Europe*”, 2011 Baltic Congress on Future Internet and Communications.
- [4] Azevedo, Fernando, A. Manuel de Oliveira Duarte e António Pinto Basto, “*Broadbandloop – Deliverable 1.3.11*”, UDA, 1998.
- [5] Banerjee, A. e M. Sirbu, "*Towards Technologically and Competitively Neutral FTTH Infrastructure*", 2003.
- [6] Bastos, Carlos. “Slides de Métodos Probabilísticos em Engenharia Electrónica e de Computadores”, 2008.
- [7] Brealey, Richard A. e Stewart C. Myers, “Princípios de Finanças Empresariais”, 5ª Edição, McGraw-Hill, 1998.
- [8] Borges, João Carlos Cruz, “*Experiemental Analysis of WiMAX and Meshed Wi-Fi Quality of Service*”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, 2009.
- [9] BROADWAN *Deliverable D21*.
- [10] Câmara Municipal de Aveiro, “Município de Aveiro – Retracto Territorial do Concelho de Aveiro”, 2010.
- [11] Carrilho, David Coelho, “Redes Híbridas de Acesso Fixo sem Fios: Análise Tecno-Económica”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, 2010.
- [12] Castro, E. e Manuel de Oliveira Duarte, “*Model for Mixed Demographic Structures*”. In IMS L A (ed.) *Broadband Access Networks, Introduction Strategies and Techno-Economic Evaluation*, p.75-86. Chapman & Hall, London, 1998.
- [13] Coelho, Sara Catarina Rasteiro, “Fibra Óptica na Rede de Acesso: Tecnologias e Soluções”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 2009
- [14] Davim, João Pedro e Armando Nolasco Pinto, “*CAPEX model for PON technology*”, Second International Conference on Evolving Internet, 2010.

- [15] Davim, João Pedro, Somayeh Ziaie e Armando Nolasco Pinto, “*CAPEX model for PON technology using single and cascaded splitter schemes*”, University of Aveiro, 2011.
- [16] Duarte, A. Manuel de Oliveira, “Conceitos da Teoria das Probabilidades com Utilidade em Telecomunicações”, Universidade de Aveiro, 2011.
- [17] Duarte, A. Manuel de Oliveira, “Análise Tecno-Económica de Redes de Telecomunicações”, Universidade de Aveiro, 2009.
- [18] Duarte, A. Manuel de Oliveira, “Considerações acerca da optimização do plano de investimento em infra-estruturas de uma rede de acesso face aos custos associados a cada intervenção de investimento”, 2011.
- [19] Duarte, A. Manuel de Oliveira, Alexander Marques, Hugo Félix, Sara Coelho, David Carrilho e Anabela Damos, “Migração de uma rede de acesso ADSL para FTTH: Aspectos de Análise Tecno-Económica e de Simulação de Mercados”, Universidade de Aveiro, 2011.
- [20] Duarte, A. Manuel de Oliveira e Sara Coelho, “Fibra Óptica na Rede de Acesso: Tecnologias e Soluções”, Universidade de Aveiro, 2010.
- [21] Duarte, A. Manuel de Oliveira, “Metodologia de classificação de áreas geográficas para efeitos da análise tecno-económica de projectos de investimento em redes e serviços de telecomunicações”, Universidade de Aveiro, 2011.
- [22] Duarte, A. Manuel de Oliveira, “Redes e Serviços de Telecomunicações: Conceitos, Modelos e Estruturas Fundamentais das Redes de Telecomunicações”, notas de estudo, Universidade de Aveiro, 2009.
- [23] Duarte, A. Manuel de Oliveira, Fernando David Ramos e Rui David Freitas, “Aplicação da ferramenta TONIC na avaliação tecno-económica de redes e serviços de telecomunicações: um estudo de caso”, 2001.
- [24] Distribuição Normal, http://pt.wikipedia.org/wiki/Distribuição_normal.
- [25] *Digital Subscriber Line*, http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Subscriber_Line.
- [26] ECOSYS, *The Celtic Initiative*, “*techno-ECONomics of integrated communication SYStems and services - Deliverable 6: OPEX models*”, March 2005.
- [27] Félix, Hugo Silveirinha e Manuel de Oliveira Duarte, “Recuperação da Ferramenta TONIC para ambiente *Windows 7 / Office 2007*”, Universidade de Aveiro, 2009.
- [28] *Fiber Optics Cabling*, <http://www.infinitecables.com/fiber.html>.
- [29] *Fiber Optics Cabling*: Siemon, <http://www.siemon.com/e-catalog>.
- [30] FTTH Council Europe, “*FTTH Business Guide*”, 2010.
- [31] *ICT Regulation Toolkit*, <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Section.3455.html>.

- [32] ITU-T Recommendation G.984.2: "Gigabyte-capable Passive Optical Networks (PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification", Março 2008.
- [33] ITU-T Recommendation G.984.2: "Gigabyte-capable Passive Optical Networks (PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification", Março 2003.
- [34] Katsianis, Dimitri, Ilari Welling, Maria Ylönen, Dimitris Varoutas, Thomas Sphicopoulos, Nils Kristian Elnegaard, Borgar T. Olsen, Lucien Budry, "The economic perspective of the mobile networks in Europe", National and Kapodistrian University of Athens - Department of Informatics and Telecommunications.
- [35] Kalhagen, K. O., Olsen, B., Stordahl, K., Lähteenoja, M., Elnegaard, N., Braune, M., Monath, T., Castro, E., Pego, P., Rocha, J., Santinha, G., Ramos, F., and Oliveira Duarte, M. - "First results on economic viability of broadband services in non-competitive areas" - Deliverable 6 in IST-2000-25172 TONIC, 2001.
- [36] Keiser, Gerd, Optical Fiber Communications, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2000.
- [37] Kyeong Soo Kim et al, "On The Evolution of PON-Based FTTH Solutions, Advanced System Technology", STMicroelectronics.
- [38] Lartigue, Jean Pierre. "EICTA Position on Next Generation Access (NGA)", I2010 – Brdo, 2008.
- [39] Markoff, John. "An Internet Pioneer Ponders the Next Revolution". December 20, 1999.
- [40] National Fiber Core Networks, <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Section.3455.html>.
- [41] Nortel, "Ethernet over WDM PON Technology Overview", Position Paper, 2008.
- [42] Organization for Economic Co-operation and Development, "Developments in Fibre Technologies and Investment", 2008.
- [43] Poisson Distribution, http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_distribution.
- [44] Rabadão, Carlos Manuel da Silva, "Redes de Acesso - Aspectos de Planeamento", dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, 1996, Universidade de Aveiro.
- [45] Rajeswari, P., N. Lavanya e Shankar Duraikannan, "Evolution Of FTTH As A Novel Subscriber's Broadband Service Access Technology", (IJCNS) International Journal of Computer and Network Security, Vol. 2, No. 10, 2010.
- [46] SARDANA Deliverable 3, "SARDANA Techno-economica results", Dezembro 2009.
- [47] SARDANA Project, <http://www.ict-sardana.eu/>.

- [48] Sigurdsson, Halldor Matthias, *Techno-Economics of Residential Broadband Deployment: Multimedia Services in Residential Broadband Networks*, Ph.D. Dissertation Defense, Lyngby, 11th June 2007.
- [49] Silva, João, “Análise Tecno-Económica em Telecomunicações: o caso FTTx”, dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, 2010.
- [50] Sousa, Nuno Miguel Saraiva, “Aspectos Tecno-Económicos de Redes e Serviços de Telecomunicações”, Universidade de Aveiro, Julho de 1999
- [51] Teixeira, António, Mário Lima e Paulo André, *Slides de Comunicações Ópticas*, 2010/2011.
- [52] Telecordia, “*ITU PON – Past, Present and Future*”, FTTH Council Webinar, 2008.
- [53] WiMax, <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>.

Anexo A: Processos Matemáticos

A.1. Processo de Poisson

Este é um processo que está associado ao número de ocorrências de um evento dentro de um determinado intervalo de tempo (ou espaço), onde os mesmos podem ocorrer em qualquer altura, com a mesma probabilidade. O referido processo foi descoberto por Simóen-Denis Poisson (1781-1840) e foi publicado no seu trabalho “Recherches sur la probabilité des jugements en matières criminelles et matière civile”.

No sentido de que:

$$P[\text{evento no intervalo } (t, t + dt)] = \rho dt. \quad (78)$$

Num intervalo infinitesimal dt : o parâmetro ρ é a densidade do processo. A probabilidade de múltiplos eventos em dt é $0[(dt)^2]$, que desaparece no limite.

Qual é a distribuição de probabilidade para o número de eventos num intervalo de comprimento t ? Seja a probabilidade de r acontecimentos $P_r(t)$. Definimos uma função geradora:

$$F(z, t) = \sum_{r=0}^{\infty} P_r(t) \cdot z^r \quad (79)$$

Através da equação (79), vemos que:

$$F(z, dt) = 1 - \rho dt + \rho z dt \quad (80)$$

Ignorando índices infinitesimais mais elevados. Acontecimentos em intervalos de tempo, que não se sobrepõem, são variáveis aleatórias independentes: a função geradora de probabilidade da sua soma é o produto das suas funções geradoras de probabilidade. Assim,

$$F(z, t + dt) = F(z, t) \{1 - \rho dt + \rho z dt\} \quad (81)$$

donde,

$$\frac{F(z, t + dt) - F(z, t)}{dt} = (\rho z - \rho) F(z, t) \quad (82)$$

E no limite,

$$\frac{d}{dt}F(z, t) = (\rho z - \rho)F(z, t) \quad (83)$$

Esta equação diferencial define $F(z, t)$. Tomada com a condição inicial óbvia, $F(z, 0) = 1$ dá-nos que:

$$F(z, t) = e^{\rho t(z-1)} \quad (84)$$

Donde as probabilidades são:

$$P_r(t) = \frac{(\rho t)^r}{r!} e^{-\rho t} \quad (85)$$

Isto representa uma distribuição de *Poisson* com média e variância $\lambda = \rho t$ [16]. Se $X \sim \text{Poisson}(\lambda)$ então:

$$E(X) = \lambda; \quad (86)$$

$$VAR(X) = \lambda; \quad (87)$$

$$M(t) = E(e^{tX}) = e^{\lambda(e^t-1)}. \quad (88)$$

Usa-se a série de Taylor para definir a exponencial:

$$e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{x^k}{k!} \right) = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \frac{x^k}{k!}, \quad (89)$$

e a média de X é, por definição:

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{x=0}^{\infty} \frac{x \cdot e^{-\lambda} \cdot \lambda^x}{x!} = e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\lambda^{x-1+1}}{(x-1)!} = \lambda \cdot e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\lambda^{x-1}}{(x-1)!} = \\ &\lambda \cdot e^{-\lambda} \sum_{x=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} = \lambda \cdot e^{-\lambda} \cdot e^{\lambda} = \lambda \end{aligned} \quad (90)$$

A.2. Distribuição de Gauss

A distribuição Gaussiana ou Normal é muito utilizada pois permite aplicar, a uma expressão matemática, métodos estatísticos e probabilísticos bastante comuns. Este tipo de distribuição tem uso numa grande variedade de áreas, análises financeiras, ciências naturais e sociais. Depende de dois parâmetros que são a média μ e variância σ^2 e é normalmente representada por $X \sim N(\mu, \sigma)$, que representa uma amostragem X com uma distribuição normal de média μ e desvio padrão σ . De notar que alguns autores utilizam a notação $N(\mu, \sigma^2)$ sendo o segundo parâmetro a variância em substituição do desvio padrão. O gráfico da função densidade de probabilidade é normalmente associado com um “sino” devido as semelhanças nas suas formas, **Figura 149**.

A seguinte formulação (98) representa a referida função densidade de probabilidade na referida função, em que μ é a média e variância σ^2 . Com valores $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$ tem-se a distribuição Normal *standard*, também denominada Normal padrão, centrada e reduzida.

$$f(x) = N(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, x \in \mathbb{R}, \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0 \quad (91)$$

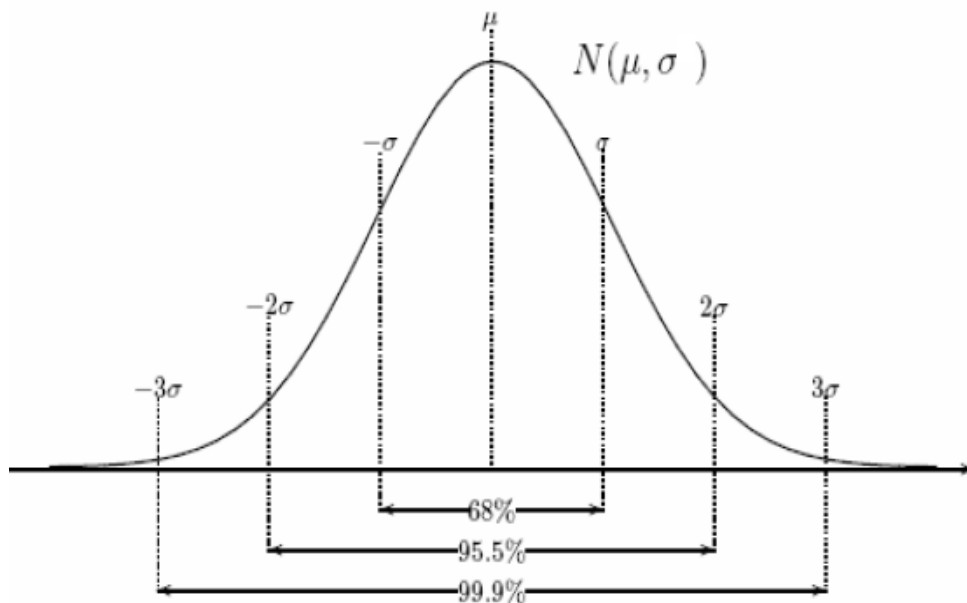


Figura 148 – Representação da curva “sino” com identificação dos parâmetros μ e σ [6].

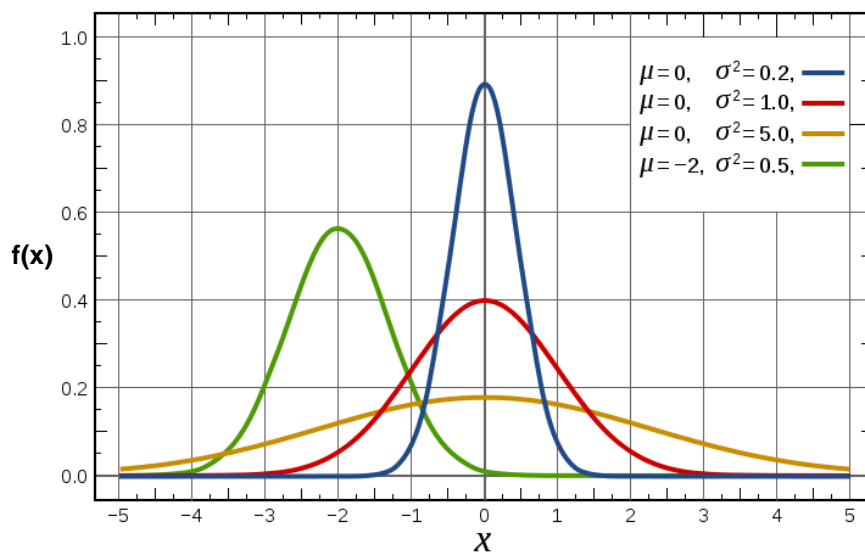


Figura 149 – Função densidade de probabilidade para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal *standard* [24].

Habitualmente utiliza-se a letra Z para representar a distribuição normal *standard* e Z_p para representar o quantil de ordem p . Esta nomenclatura sofre variações de autor para autor, onde por vezes Z_p representa o quantil de ordem $1 - p$, ou $(1 - p)/2$.

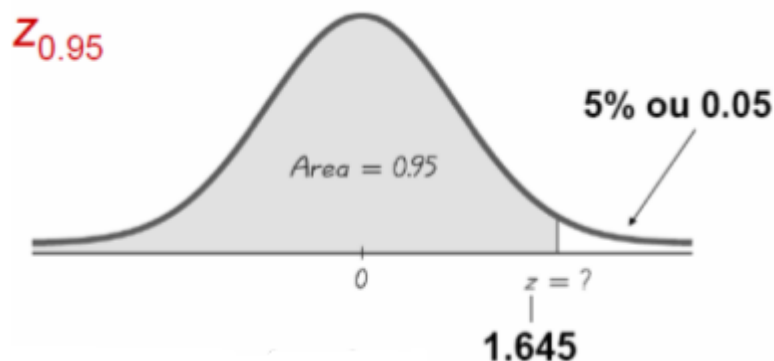


Figura 150 – Quantil de ordem 0,95, que terá valor positivo [6].

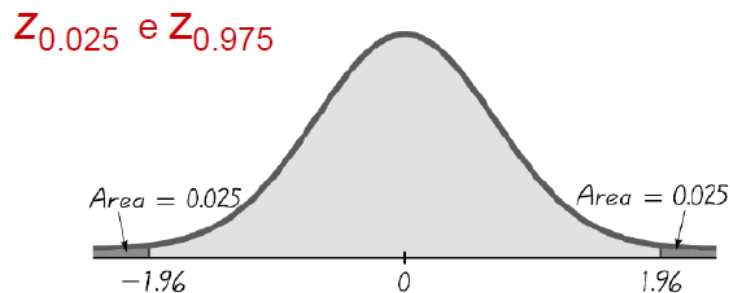


Figura 151 – Quantis 0,025 e 0,975, em que z terá um valor negativo e positivo, respectivamente [6].

Como foi feita na **Secção 4.2.2.1** deste documento para a função de *Poisson*, também para a distribuição Gaussiana é possível calcular a CDF (*Cumulative Distribution Function*) representada por $\Phi(x)$, representando a probabilidade da variável aleatória estar no intervalo $]-\infty; x]$. A função distribuição normal cumulativa toma a forma do seguinte integral e as suas curvas em “S” estão representadas na Figura 152.

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (92)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (93)$$

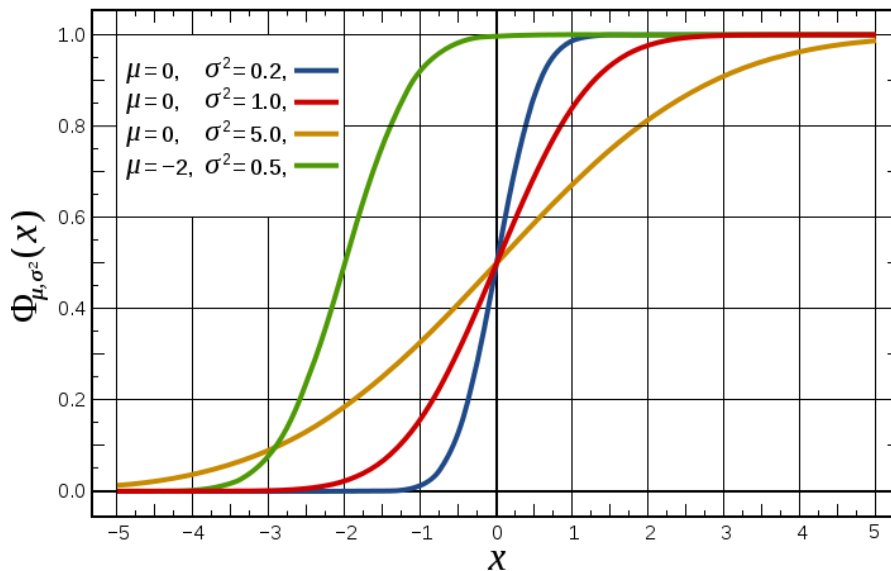


Figura 152 - Função densidade de probabilidade cumulativa para quatro diferentes conjuntos de parâmetros; a linha vermelha representa a distribuição normal *standard* [24].

Observando a figura anterior, e comparando-o com a **Figura 35**, poder-se-á afirmar que também se poderia utilizar a CDF da função normal para representar distribuição de população descrita na **Secção 4.2.2.1**.

Anexo B: Distância média entre o centro de um círculo e um ponto aleatório P contido no seu interior [21]

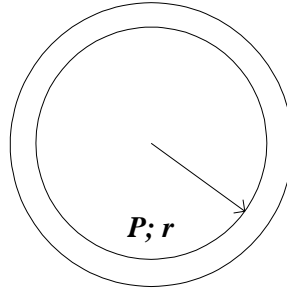


Figura 153 – Círculo externo de raio b e círculo interno de raio r variável entre $[0;b]$ [21].

Seja b o raio do círculo externo representado na Figura 153 e considere-se o conjunto de todos os pontos que estão a uma distância r do centro. Esses pontos estão contidos numa circunferência de perímetro $L = 2\pi r$ e pode-se considerar que a sua “quantidade”, embora incontável, é proporcional a esse perímetro. Considere-se que cada ponto referido representa um potencial cliente, dentro da área circular de raio r , onde estão distribuídos uniformemente.

Se for considerado agora o conjunto de todos os pontos que estarão a uma distância r' do centro do círculo, também a sua quantidade será incontável mas igualmente se poderá dizer que será proporcional a $L' = 2\pi r'$. Se $r' < r$ então o número de pontos contido na área de raio r é superior ao número de pontos na área r' .

A média do número de pontos a uma distância r do centro do círculo pode ser calculada como a soma ponderada de todos os valores de r multiplicados pela “quantidade” de pontos que estão a essa distância do centro do círculo, quando r varia entre 0 e b , a dividir pela “quantidade” total de pontos no interior do círculo (ou seja, pela sua área $A = \pi b^2$).

Uma vez que varia continuamente entre 0 e b , a referida soma ponderada vai-se transformar no seguinte integral:

$$\frac{\int_0^b (r \cdot 2\pi r) \cdot dr}{\pi b^2} = \frac{2\pi \cdot \int_0^b r^2 dr}{\pi b^2} = \frac{2\pi \cdot \left[\frac{r^3}{3} \right]_0^b}{\pi b^2} = \frac{2\pi \cdot \frac{b^3}{3}}{\pi b^2} = 2 \cdot \frac{b}{3} \quad (94)$$

A partir deste integral é possível conhecer o valor de r para o qual estaria concentrada a totalidade dos pontos, imaginando que todos os pontos estão concentrados sobre o perímetro desses círculo. Esse valor é $r = 2b/3$. Dado este valor é possível efectuar o mesmo tipo de análise feita ao longo deste documento para uma área quadrada com distribuição uniforme da população.

Anexo C: Metodologia para a classificação de áreas geográficas [21]

C.1. Introdução e Pressupostos

Para além da localização geográfica estudada neste documento, existem uma grande variedade de tipos de localizações que podem influenciar a análise que se faz, bem como a tecnologia escolhida para fornecer serviços de banda larga aos consumidores. Se as estimativas de procura dos serviços nos permite estimar as receitas futuras, a distribuição geográfica dos seus consumidores é um factor chave para o projecto de engenharia da rede e para o cálculo dos custos que lhe estão associados.

Lidar com toda esta complexidade está fora do âmbito deste documento que procura apenas apresentar alguma sistematização sobre possíveis abordagens a essa complexidade.

Nestas condições consideram-se os seguintes pressupostos:

- 1) As densidades urbanas dependem dos seguintes factores:
 - a) Das condições económicas e culturais de cada país e região;
 - b) Do tamanho e da função dos aglomerados urbanos;
 - c) Da posição mais periférica ou central de cada distrito urbano dentro de cada cidade ou área metropolitana.
- 2) A procura de diferentes serviços e aplicações depende de condições económicas e culturais, variando de acordo com o país, região, cidades e área da cidade que estamos a considerar.
- 3) No que diz respeito aos custos de instalação, é conveniente definir um modelo geométrico genérico projectado para o cálculo do comprimento do cabo e das condutas para ligar este modelo com as condições particulares de cada área geográfica.

C.2. Metodologia *Cluster*

A metodologia *cluster* é baseada num modelo territorial de quadrados regularmente distribuídos [12], que permite a descrição de áreas geográficas grandes e heterogéneas. Por outras palavras, esta abordagem consiste na conversão de um dado território heterogéneo num padrão de elementos repetidos. Considere, por exemplo, uma dada unidade territorial administrativa (UTA) representada na figura abaixo:

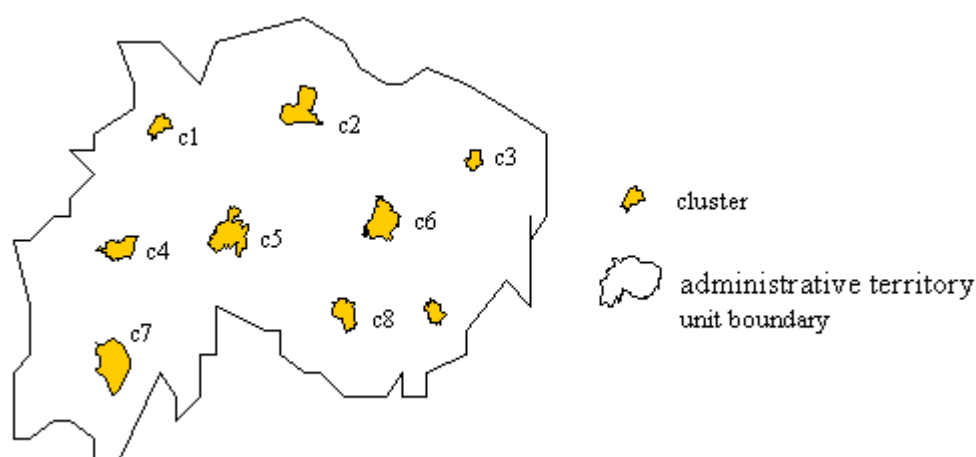


Figura 154 – Unidade Territorial Administrativa [35].

A unidade contém 9 aglomerados ou *clusters* de população, C_1 até C_9 . Os *clusters* diferem uns dos outros em relação aos seus padrões morfológicos, tamanho da área, número de população e distâncias entre eles.

Os dados estatísticos normalmente disponíveis para uma unidade territorial administrativa respeitante à população e área são:

- Área total da unidade territorial administrativa;
- População total da unidade territorial administrativa;
- Número de *clusters*;
- População em cada *cluster*.

Com estes dados é possível calcular a densidade populacional da Unidade Territorial Administrativa (UTA) através da seguinte expressão:

$$\text{Densidade Populacional (UTA)} = \frac{\text{População Total (UTA)}}{\text{Área (UTA)}} \quad (95)$$

Este tipo de densidade pode ser definido por densidade populacional grosseira. Contudo, não é possível calcular directamente a densidade populacional da rede da área administrativa. A densidade populacional da rede é definida como a relação entre a população e a área do *cluster*. Dados estatísticos relativos às áreas dos *clusters* não estão normalmente disponíveis. Para obter este indicador é necessário analisar a informação cartográfica.

A densidade populacional da rede de um *cluster* (C) é dada por:

$$\text{Densidade Populacional da rede (C)} = \frac{\text{População Total (C)}}{\text{Área (C)}} \quad (96)$$

A densidade populacional da rede do total dos *clusters* (C_1 até C_9) pertencentes à UTA é dada por:

$$\text{Densidade Populacional da rede (C}_1 \text{ até C}_9\text{)} = \frac{\text{População Total (C}_1 \text{ até C}_9\text{)}}{\text{Área total (C}_1 \text{ até C}_9\text{)}} \quad (97)$$

Para calcular a distância média entre *clusters* (C_1 até C_9) é necessário assumir que os *clusters* (C_1 até C_9) formam um padrão regular de quadrados com tamanhos fixos (L) e separados por distâncias fixas (D) como representado abaixo:

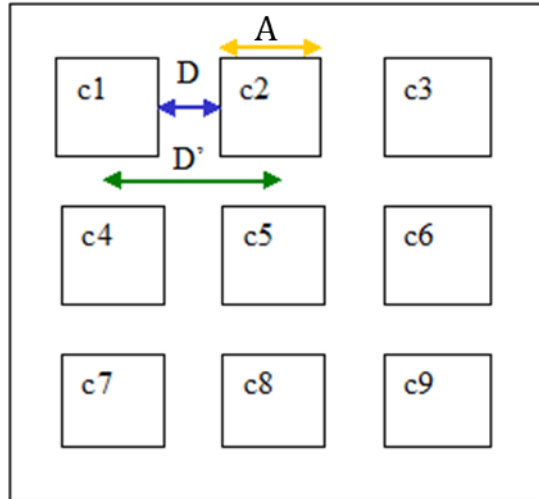


Figura 155 - Modelo Territorial dos quadrados distribuídos regularmente [35].

A distância média D entre os *clusters* (C_1 até C_9) é calculada através da seguinte expressão:

$$D = A \left(\frac{1}{\sqrt{F}} - 1 \right) \quad (98)$$

Onde:

A – Lado de cada cluster;

F – Area total da fracção ocupada pelos clusters.

A distância média D' entre os centros dos clusters (C_1 até C_9) é dada pela expressão abaixo:

$$D' = L \left(\frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (99)$$

É assim necessário desenvolver metodologia de suporte, que permita a identificação e caracterização de áreas geográficas grandes e heterogéneas. O resultado desta metodologia é a definição de um padrão de quadrados distribuídos regularmente descritos na secção acima. O modelo será aplicado em particular para a caracterização de áreas rurais de um país do Sul da Europa como Portugal.

C.2.1. Pressupostos do modelo

De forma a representar a disposição das infra-estruturas de comunicações nas regiões em consideração, é possível recorrer a um modelo geométrico abstracto baseado no modelo territorial dos quadrados regularmente distribuídos descrito na **Secção C.2**. Isto pode ser descrito da seguinte maneira:

- Cada região é considerada como uma sobreposição de um conjunto de cidades e vilas sobre o resto do território;
- A área restante é representada, em termos estatísticos, por uma amostra constituída por nove nós habitacionais;
- Dentro de cada amostra, um dos nós (possivelmente o nó central) desempenha o papel de ponto de acesso local (*LAP – Local Access Point*) ao qual todos os outros nós estão ligados. Isto é representado na (linha a negrito). O nó que alberga o LAP é ligado ao mais próximo ponto de acesso de banda larga (*BAP – Broadband Access Point*). Diferentes meios físicos podem ser utilizados para suportar esta ligação BAP-LAP (por exemplo, fibra óptica, rádio, etc.).

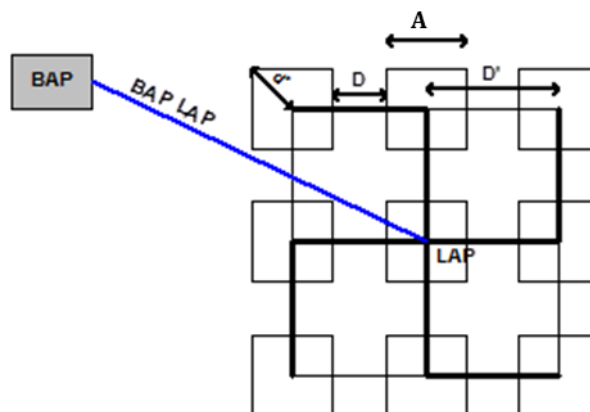


Figura 156 – Modelo geométrico [35].

Os atributos chave da amostra do *cluster* representando uma determinada região (com o objectivo do *layout* das infra-estruturas de comunicações) são os seguintes:

- A densidade de habitações dentro dos nós habitacionais ou, em alternativa, o número de habitações por nó;
- A distância entre as fronteiras dos nós, (D) ou, alternativamente, a distância entre o centro dos nós, (D');
- O comprimento do BAP_LAP;
- O tamanho dos nós, comprimento do lado, (A), ou o comprimento da meia diagonal, (d').

C.3. Identificação e Caracterização das Áreas Rurais usando a Metodologia Cluster

Nesta secção é aplicada a metodologia *cluster*, descrita na secção anterior, que permite a identificação e caracterização de grandes e heterogéneas áreas geográficas. A metodologia é aplicada, em particular, para identificar e classificar as áreas não competitivas de Portugal.

O primeiro passo é a divisão das áreas rurais do país em três categorias, definidas em termos das densidades populacionais. Isto requer a análise de dados estatísticos com dados cartográficos. A figura abaixo identifica, ao nível do país, as áreas seleccionadas.

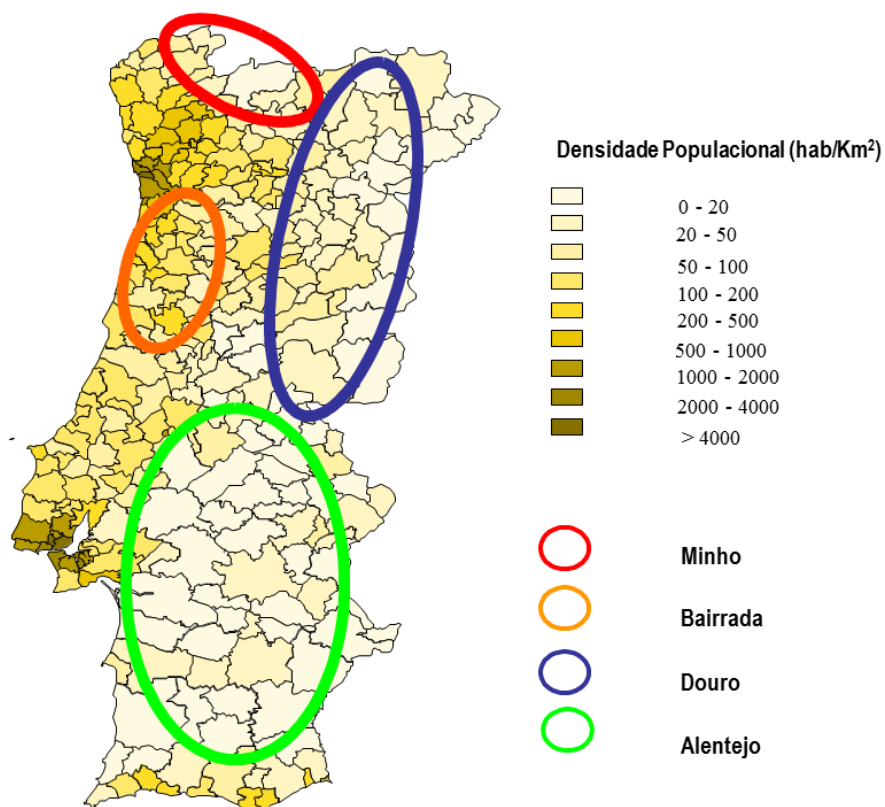


Figura 157 - Densidades populacionais dos municípios e as áreas rurais seleccionadas [21].

As três categorias de áreas rurais identificadas são: Alentejo, Douro e Bairrada e Minho.

Alentejo

Esta área é caracterizada pela alta concentração de população com grandes áreas vazias entre os *clusters*. A figura abaixo representa este tipo de área.

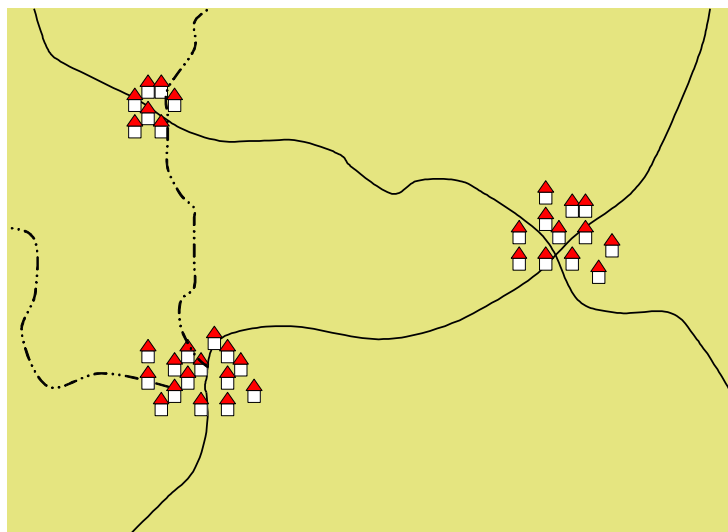


Figura 158 – Ilustração do Alentejo [21].

Douro

Nesta área a população é altamente concentrada, com algum espalhamento de população entre os clusters. A figura abaixo representa esta área.

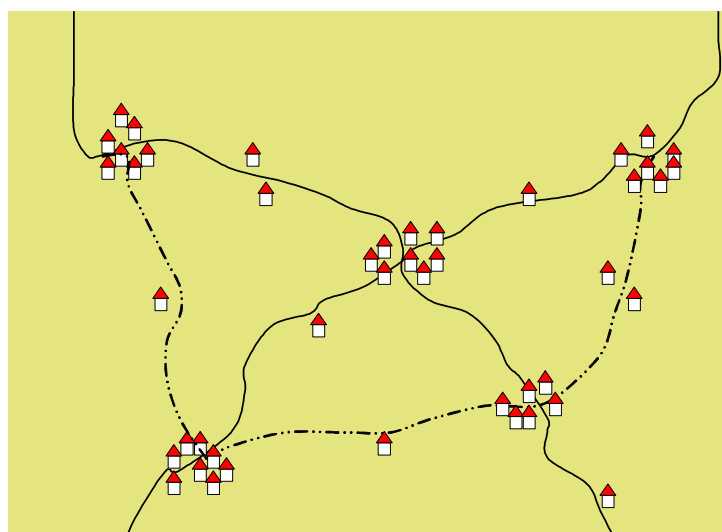


Figura 159 – Ilustração do Douro [21].

Bairrada

Nesta área, os *clusters* estão espalhados ao longo das estradas formando um padrão linear de povoações. Ilustração representada abaixo mostra um exemplo da distribuição tipo nesta zona do país.

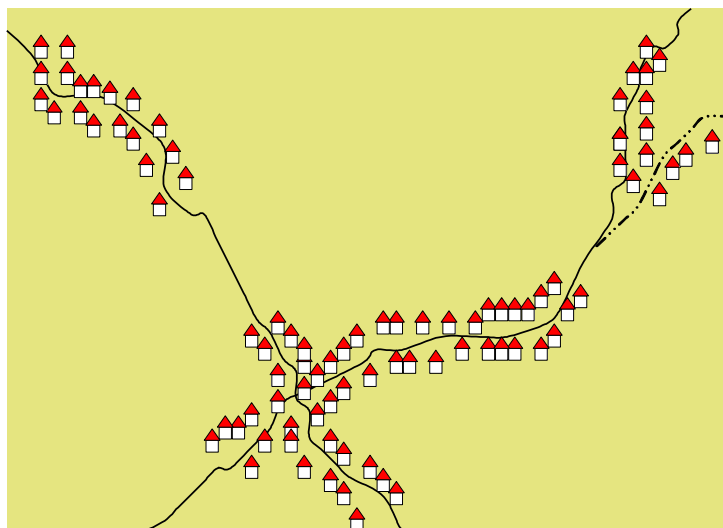


Figura 160 – Ilustração da Bairrada [21].

Minho

A população nesta área está espalhada segundo um padrão homogéneo e está representado na figura seguinte:

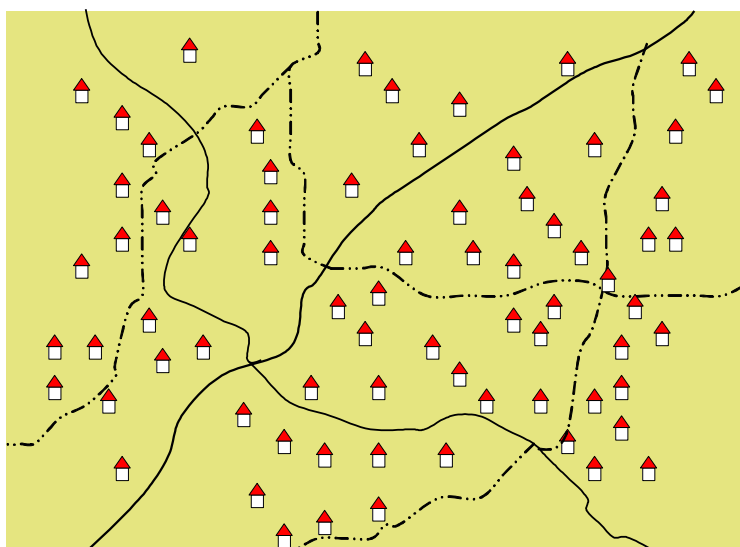


Figura 161 – Ilustração do Minho [21].

Para cada categoria de áreas rurais foi seleccionada uma amostra representativa dos municípios. Generalizando os resultados obtidos na amostra que combina os dados estatísticos e cartográficos é possível fazer a caracterização de cada tipo de área em termos de: área total, população total, densidade populacional e residências em cada *cluster*. A distância média entre *clusters* é calculada aplicando o modelo da estrutura territorial representada na equação (98).

A próxima tabela mostra as principais características geográficas de cada uma das três áreas rurais identificadas.

Tabela 121 – Indicadores geográficos para as áreas rurais em Portugal [35].

Área Total	Alentejo	Douro	Bairrada	Minho
Tamanho da População	470000	670000	630000	670000
Área (km ²)	27000	22000	5500	4200
Densidade populacional (hab/km ²)	18	30	114	160
Clusters (valores médios)				
Área (km ²)	0,35	0,4	0,9	64
Densidade Populacional (hab/km ²)	7200	1820	2840	250
Densidade residencial (res/km ²)	3750	1240	1050	125
Distância entre clusters (km)	10,5	4,4	2,7	0

Nas secções seguintes serão descritas as três tecnologias em estudo para prover o acesso de banda larga.

C.3.1. Percentagem de área coberta (caso particular do Minho)

A região do Minho, apesar de ser considerada rural é uma região com características geográficas e padrões habitacionais bem diferentes das outras regiões em estudo, como se pôde ver anteriormente. Nesta área do país, iremos assumir que a localização geográfica das centrais locais está definida e tem uma distribuição tal que no nosso modelo geométrico, ficam no centro de cada quadrado da **Figura 156**.

Assume-se que no Minho, a distância entre os centros de cada nó é fixa para todas as tecnologias, ou seja, o local onde acaba a fibra já está predestinado. A área de cada nó (quadrado da **Figura 155**) nesta região é de 64 Km². Por isso, dependendo do raio de alcance da tecnologia (r_a) a população servida irá variar.

Então, iremos ter três situações distintas:

- o raio de alcance é menor que metade do lado do quadrado, isto é, a área coberta é igual à área do círculo de raio igual ao raio de alcance da tecnologia;

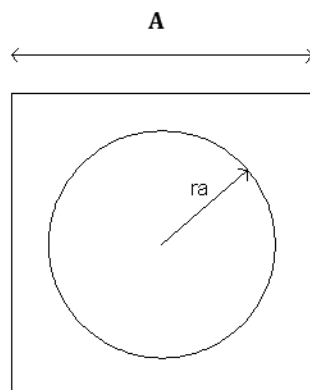


Figura 162 – Raio de alcance é menor que metade do lado do quadrado.

- o raio de alcance é maior que metade da diagonal do quadrado, ou seja, toda a área do quadrado é coberta. Como nesta região os quadrados estão juntos (distância entre *clusters* igual a zero) irá haver zonas em que há dupla cobertura;

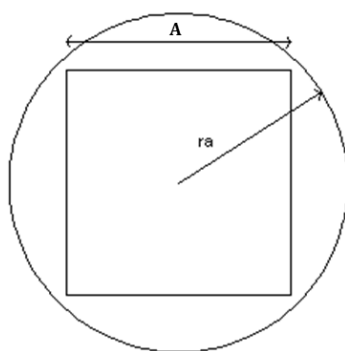


Figura 163 – O raio de alcance é maior que metade da diagonal do quadrado.

- o raio de alcance está na situação intermédia dos dois pontos anteriores;

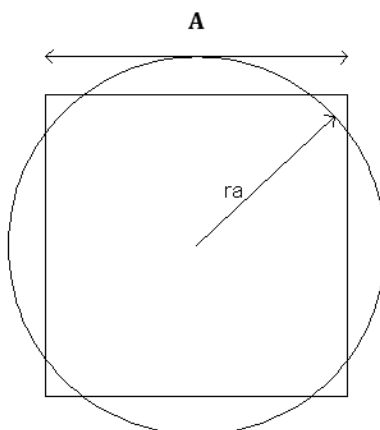


Figura 164 – O raio de alcance está na situação intermédia dos dois pontos anteriores.

Nesta última situação, o cálculo da área coberta não é tão trivial como nas anteriores. Para melhor compreensão, vamos, primeiro, focalizar na área coberta em apenas um quarto do quadrado.

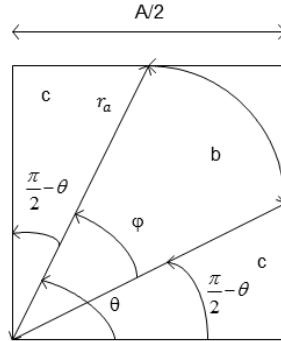


Figura 165 – Pormenor de um quarto do cluster.

Desta figura podemos dizer que a área coberta num quarto do quadrado é a área do sector circular b mais duas vezes a área do triângulo c . É fácil de ver que os dois triângulos definidos na figura são geometricamente iguais e com áreas iguais.

Para o cálculo da referida área define-se dois ângulos θ e φ . O ângulo θ é definido em um triângulo rectângulo como sendo o ângulo oposto a um cateto de comprimento $A/2$ e hipotenusa igual a r_a . Se a $\pi/2$ se subtrair os dois menores ângulos do triângulo, $(\pi/2 - \theta)$ é o menor ângulo interno do triângulo, sobra o ângulo φ .

O cálculo da área c é simplesmente a área de um triângulo de lado igual a $A/2$ e altura igual a $r_a \sin(\pi/2 - \theta)$. A área do sector circular b , é fácil de calcular, é a parte $\varphi/2\pi$ de um círculo.

De seguida, mostra-se as expressões que permitem calcular estes ângulos a partir do raio de alcance da tecnologia e área do *cluster* (ou equivalentemente do lado do quadrado). Além disso, também se mostra as expressões que permitem calcular a área do sector circular e dos triângulos.

Num *cluster* existem oito áreas do tipo c e quatro áreas do tipo b , ou seja, $\text{Área coberta} = 4 \times 2 \times c + 4 \times b$.

Tendo em conta que:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\pi}{2} - 2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = 2\theta - \frac{\pi}{2} \\ \theta = \arcsin\left(\frac{A/2}{r_a}\right) \end{cases}, \begin{cases} c = \frac{A/2 \times r_a \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{2} \\ b = \pi r_a^2 \times \frac{\varphi}{2\pi} \end{cases} \quad (100)$$

Tabela 122 – Dados do Minho.

	Área do Nó (Node Area)	L/2	0,7*L
Minho	64	4	5,66
	ADSL	VDSL	LMDS
Raio da Tecnologia	3	1,5	5
População Servida (%)	44,2%	11,0%	97,2%

Podemos ver graficamente estes mesmos valores e, de uma maneira geral qual será a percentagem de população servida (ou área coberta pela tecnologia) para uma qualquer relação entre o raio da tecnologia e área do *cluster*.

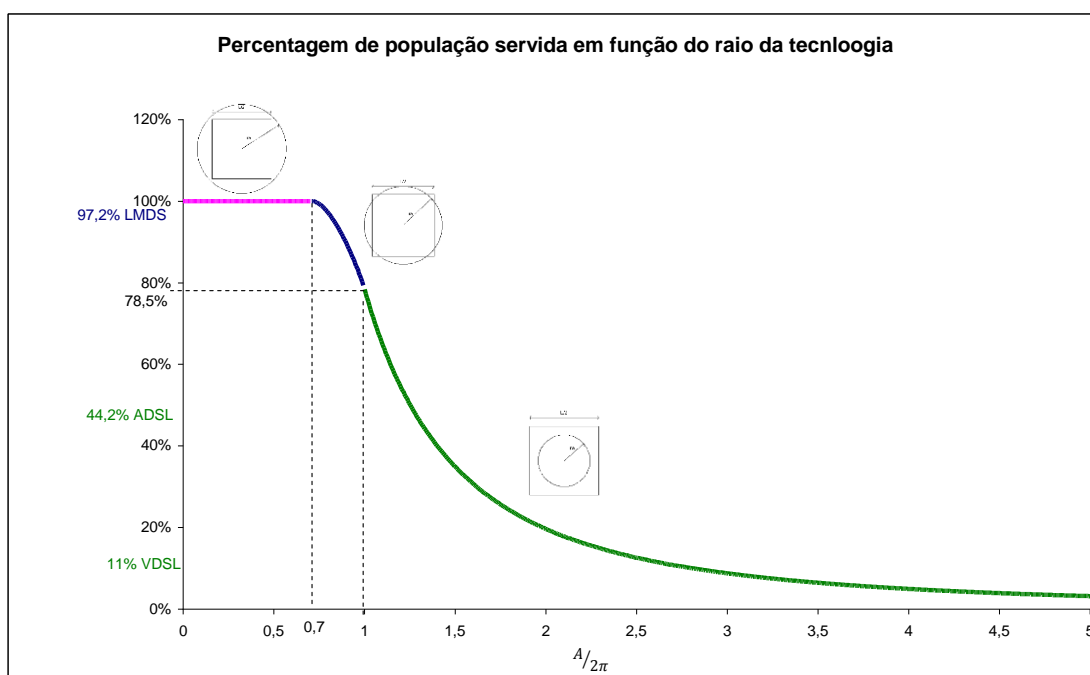


Figura 166 – Percentagem de população servida em função do raio da tecnologia

Vale a pena reforçar que ao contrário das outras regiões, em que para todas as tecnologias toda a população no *cluster* era servida, no Minho a população servida depende do raio da tecnologia.